

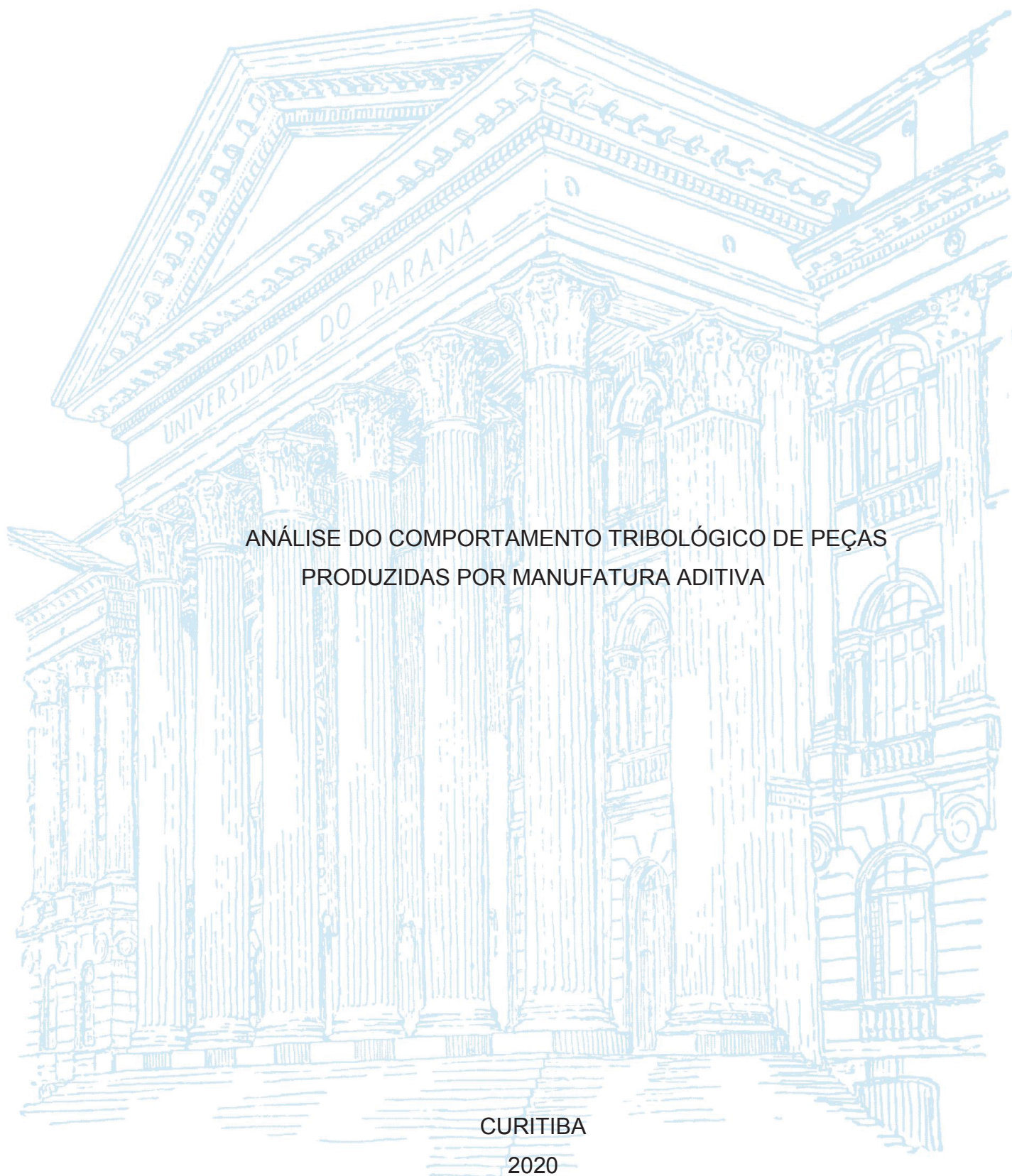
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA NOREMBERG DE ARAUJO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE PEÇAS  
PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA

CURITIBA

2020



JULIANA NOREMBERG DE ARAUJO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE PEÇAS  
PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

CURITIBA  
2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A663a      Araujo, Juliana Norenberg de  
              Análise do comportamento tribológico de peças produzidas por manufatura aditiva  
              [recurso eletrônico] / Juliana Norenberg de Araujo. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção, 2020.

Orientador: Fabiano Oscar Drozda.

1. Tribologia. 2. Polímeros - Aditivos. 3. Impressão. I. Universidade Federal do Paraná.  
II. Drozda, Fabiano Oscar. III. Título.

CDD : 680

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JULIANA NOREMBERG DE ARAUJO** intitulada: **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA**, sob orientação do Prof. Dr. FABIANO OSCAR DROZDA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2020.



FABIANO OSCAR DROZDA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



MARCOS AUGUSTO MENDES MARQUES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



ARINEI CARLOS LINDBECK DA SILVA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



SIDNEI ANTONIO PIANARO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Aos meus pais, Ariomar e Denise, com quem compartilhei momentos de ansiedade, alegria, amor e gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, professor Fabiano, pela orientação, apoio e conhecimentos transmitidos neste período.

Aos meus pais, pela educação dada e pelo incentivo para que continue atrás dos meus objetivos.

Ao GIMa, grupo de pesquisa de Inteligência na Manufatura da UFPR, pelo uso do laboratório e disponibilização da impressora 3D.

Ao Complexo de Laboratórios Multiusuários da UEPG (C-LABMU), pelo uso dos equipamentos necessários para os ensaios de desgaste e microscopia eletrônica de varredura, assim como aos técnicos Silvio Henrique e Milton Domingos Michél.

Aos professores Luis Antonio Pinheiro e Selauc Vurobi Junior, pela disponibilidade sempre que precisei de auxílio com as fichas de solicitação de uso dos equipamentos do C-LABMU.

A todas as pessoas que de qualquer maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus por me conceder a cada dia uma página da vida.

Em voc4 existam as causas da sua  
derrota e vibram as for7as do seu triunfo.

(Andr4 Luiz)



## RESUMO

Até 2009 a tecnologia de impressão 3D era protegida por patentes, devido ao seu alto custo, somente grandes centros de pesquisa utilizavam a manufatura aditiva. Com a quebra da patente em 2009 esta tecnologia tem se tornado cada vez mais popular devido ao surgimento de opções de baixo custo e fácil utilização e a cada ano mais indústrias estão aderindo as tecnologias de manufatura aditiva e tornando suas fábricas mais inteligentes. Em paralelo, desenvolvimentos de novos materiais, em geral filamentos termoplásticos, estão sendo inseridos no mercado e desta forma tornam-se cada vez mais necessários estudos de caracterização experimental dos materiais para fornecer dados técnicos aos utilizadores. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o comportamento tribológico de peças poliméricas de ABS produzidas por impressão 3D FDM e sua relação com o parâmetro de processo orientação de impressão. Para isto foram impressos corpos de prova utilizando-se a tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM) e estes foram submetidos a ensaios de desgaste pino sobre disco, conforme norma ASTM G99. Os resultados obtidos mostraram que as amostras impressas na orientação vertical apresentaram maiores valores de desgaste que as amostras impressas na orientação horizontal, isto ocorreu devido à presença de trincas entre as camadas de deposição do material polimérico da peça. Com a análise da superfície de desgaste foi possível identificar o desgaste interfacial nas amostras impressas na orientação horizontal devido à presença do mecanismo adesivo e nas amostras impressas na orientação vertical identificou-se o desgaste coesivo com a presença do mecanismo abrasivo.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Modelagem por fusão e deposição; Impressão 3D; ABS; Desgaste



## ABSTRACT

Until 2009, 3D printing technology was protected by patents, due to its high cost, only large research centers used additive manufacturing. With the patent breaking in 2009, this technology has become increasingly popular due to the emergence of low cost and easy to use options and each year more industries are adhering to additive manufacturing technologies and making their factories smarter. In parallel, developments of new materials, in general thermoplastic filaments, are being introduced on the market and, thus, experimental characterization studies of the materials are becoming increasingly necessary to provide technical data to users. The objective of this work was to characterize the tribological behavior of ABS polymeric parts produced by 3D FDM printing and its relationship with the process parameter of printing orientation. For this, specimens were printed using fusion and deposition modeling technology (FDM) and these were subjected to pin-to-disc wear tests, according to ASTM G99. The results obtained showed that the samples printed in the vertical orientation presented higher wear values than the samples printed in the horizontal orientation, this occurred due to the presence of cracks between the deposition layers of the polymeric material of the piece. With the analysis of the wear surface it was possible to identify the interfacial wear in the printed samples in the horizontal orientation due to the presence of the adhesive mechanism and in the printed samples in the vertical orientation the cohesive wear was identified with the presence of the abrasive mechanism.

**Key Words:** Additive manufacturing; Fused deposition modeling; 3D printing; ABS; Wear

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DE PEÇA PRODUZIDA POR IMPRESSÃO 3D FDM .....	19
FIGURA 2 - EXEMPLO DE MARCAS DE DEGRAUS DE DEPOSIÇÃO (EFEITO ESCADA) .....	19
FIGURA 3 – PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D .....	25
FIGURA 4 - PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA .....	26
FIGURA 5 - ESQUEMA DO PROCESSO FDM .....	28
FIGURA 6 - EXEMPLOS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO VERTICAL E HORIZONTAL .....	29
FIGURA 7 – ESQUEMA DE IMPRESSÃO APRESENTANDO O ÂNGULO DE VARREDURA.....	30
FIGURA 8 – EXEMPLOS DE ALTURAS DE CAMADA .....	31
FIGURA 9 – EXEMPLOS DE DENSIDADES DE ENCHIMENTO DIFERENTES .....	31
FIGURA 10 - VISTA SUPERIOR DOS TIPOS DE PADRÃO DE PREENCHIMENTO RETILÍNEO, LINEAR, CONCÊNTRICO E FAVO DE MEL .....	32
FIGURA 11 – ESPESSURA DO FILAMENTO DEPOSITADO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE IMPRESSÃO.....	34
FIGURA 12 - ESQUEMA DA SINTERIZAÇÃO POLIMÉRICA ENTRE OS FILAMENTOS .....	35
FIGURA 13 - TRIBÔMETROS, DESENVOLVIDOS POR LEONARDO DA VINCI, PARA A DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE ATRITO: (A) EM SUPERFÍCIES HORIZONTAIS E INCLINADAS; (B) CONSIDERANDO O EFEITO DA ÁREA APARENTE; (C) UTILIZANDO UMA POLIA; E (D) CONSIDERANDO O TROQUE NUM CILINDRO.....	39
FIGURA 14 - DESENHO ESQUEMÁTICO DOS QUATRO MODOS REPRESENTATIVOS DE DESGASTE.....	39
FIGURA 15 – ETAPAS DO MECANISMO DE DESGASTE POR ADESÃO: (A)ALISAMENTO DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL DE MENOR DUREZA; (B)ACUMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO ABAIXO DA SUPERFÍCIE; (C)FORMAÇÃO DE TRINCAS SUB-SUPERFICIAIS; (D)FORMAÇÃO DE UMA PARTÍCULA DE DESGASTE COM A FORMA DE UMA LÂMINA.....	40

FIGURA 16 – MICRO SULCAMENTO E MICRO CORTE, DECORRENTES DO DESGASTE ABRASIVO .....	41
FIGURA 17 – MECANISMO DE DESGASTE POR FADIGA .....	42
FIGURA 18 - DUAS CLASSES GERAIS DE DESGASTE POLIMÉRICO: INTERFACIAL E COESIVO .....	43
FIGURA 19 - GEOMETRIAS USADAS NOS TESTES DE ENSAIO POR DESLIZAMENTO. (A) ANEL-ANEL AO LONGO DE UMA LINHA; (B) ANEL-ANEL FACE-A-FACE. (C) PINO-DISCO NA SUPERFÍCIE; (D) PINO-DISCO SOBRE A CURVATURA; (E) BLOCO-ANEL; (F) PINO-PLANO.....	44
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO DISPOSITIVO PINO SOBRE DISCO .....	45
FIGURA 21 - ETAPAS DE TRABALHO .....	46
FIGURA 22 – FILAMENTO ABS UTILIZADO PARA IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	47
FIGURA 23 – DESENHO DAS AMOSTRAS CRIADO NO SITE TINKERCAD APRESENTANDO AS DUAS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO: (A) HORIZONTAL (B) VERTICAL .....	48
FIGURA 24 – DEPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE ABS NAS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO: (A) HORIZONTAL E (B) VERTICAL.....	48
FIGURA 25 – INTERFACE <i>SOFTWARE</i> CURA .....	49
FIGURA 26 – IMPRESSORA GTMAX CORE AD .....	51
FIGURA 27 – TRIBÔMETRO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESGASTE.....	51
FIGURA 28 – INTERAÇÃO ENTRE PINO E ESFERA DE ROLAMENTO COM A AMOSTRA.....	52
FIGURA 29 – EXEMPLOS DE CORPOS DE PROVA IMPRESSOS .....	53
FIGURA 30 – PERDA DE VOLUME COM O AUMENTO DA DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO .....	57
FIGURA 31 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO HORIZONTAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTOS DE (a) 30x e (b) 50x .....	60
Figura 32 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO HORIZONTAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA	

DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTOS DE (a) 100m e (b) 500 x .....	60
FIGURA 33 – PINO DO EQUIPAMENTO DE DESGASTE APÓS A REALIZAÇÃO DO ENSAIO COM A PRESENÇA DE MATERIAL POLIMÉRICO TRANSFERIDO DA AMOSTRA.....	61
FIGURA 34 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO VERTICAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTO DE 50 X.....	62
FIGURA 35 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO VERTICAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTO DE 26X.....	63
FIGURA 36 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO VERTICAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTOS DE (a) 50x e (b) 100x .....	63
FIGURA 37 - EFEITO DA TEMPERATURA NA LIGAÇÃO ENTRE AS CAMADAS DE DEPOSIÇÃO DO POLÍMERO: (a) MENOR TEMPERATURA E (b) MAIOR TEMPERATURA .....	64
FIGURA 38 - EFEITO DA VISCOSIDADE NA AREA DE CONTATO ENTRE AS CAMADAS DE DEPOSIÇÃO DO POLÍMERO: (a) MAIOR VISCOSIDADE E (b) MENOR VISCOSIDADE .....	65

## **LISTA DE QUADROS**

QUADRO 1 – RESUMO DOS MÉTODOS DE IMPRESSÃO 3D .....	26
-----------------------------------------------------	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES DO ABS.....	38
TABELA 2 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO FDM PARA ABS.....	50
TABELA 3 – CONFIGURAÇÕES DE IMPRESSÃO.....	50
TABELA 4 – PARÂMETROS ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO .....	52
TABELA 5 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS POR ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO E DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DO ENSAIO DE DESGASTE....	55
TABELA 6 – VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA .....	56
TABELA 7 – VALORES MÉDIOS DE PERDA DE VOLUME DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE DESGASTE .....	56
TABELA 8 – RESULTADOS DE PERDA DE VOLUME PARA AMOSTRAS DOS ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 100M .....	58
TABELA 9 – TESTE DE KRUSKAL WALLIS - RESULTADOS DE PERDA DE MASSA ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 100 M.....	59
TABELA 10 – RESULTADOS DE PERDA DE VOLUME PARA AMOSTRAS DOS ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300 M .....	59
TABELA 11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA – RESULTADOS DE PERDA DE MASSA DOS ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300 M.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	- Acrilonitrila Butadieno Estireno
ANOVA	- Analysis of Variance (análise de variância)
CAD	- Computer-aided design (projeto assistido por computador)
DMLS	- Direct Metal Laser Sintering (sinterização de metal a laser)
DWI	- Direct Ink Writing (deposição em tinta)
EBM	- Fabricação aditiva de feixe de elétrons
FDM	- Fused Deposition Modeling (modelagem por fusão e deposição)
LOM	- Laminated Object Manufacturing (fabricação de objetos laminados)
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
PA	- Poliamida
PC	- Policarbonato
PLA	- Ácido Polilático
PP	- Polipropileno
SHS	- Selective Heat Sintering (Sinterização seletiva a laser)
SL ou SLA	- Stereolithography apparatus (estereolitografia)
SLS	- Selective Laser Sintering (sinterização seletiva a laser)
STL	- Standard tessellation language (linguagem padrão de imagem 3D)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	ESCOPO (DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E LIMITAÇÕES)	21
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D	23
2.1.1	Métodos de impressão 3D	26
2.1.2	Tecnologia FDM – funcionamento do processo	28
2.1.3	Variáveis do processo FDM	29
2.1.3.1	Orientação de impressão	29
2.1.3.2	Temperatura de extrusão	30
2.1.3.3	Ângulo de varredura	30
2.1.3.4	Espessura da camada	31
2.1.3.5	Densidade de preenchimento	31
2.1.3.6	Padrão de preenchimento	32
2.1.3.7	Temperatura da plataforma	33
2.1.3.8	Velocidade de impressão	33
2.1.3.9	União entre as camadas	34
2.2	POLÍMEROS	35
2.2.1	Filamentos para modelagem FDM	36
2.2.1.1	Acrilonitrila Butadieno Estireno	37
2.3	TRIBOLOGIA	38
2.3.1	Desgaste adesivo	40
2.3.2	Desgaste abrasivo	41
2.3.3	Desgaste por fadiga	41
2.3.4	Desgaste corrosivo	42
2.4	COMPORTAMENTO DE DESGASTE POLIMÉRICO	42
2.5	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO DESGASTE	44
2.5.1	Ensaio de desgaste pino sobre disco	45

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>46</b>
3.1	procedimento experimental .....	47
3.1.1	Definição do material polimérico a ser utilizado para impressão dos corpos de prova .....	47
3.1.2	Definição dos parâmetros de processo e impressão dos corpos de prova 48	
3.1.3	Ensaio de desgaste – Pino sobre disco .....	51
3.1.4	Análise dos resultados do ensaio de desgaste .....	53
3.1.5	Análise da superfície de desgaste .....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
4.1	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO .....	55
4.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	58
4.3	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE .....	60
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	67
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a norma ASTM International (2013) F2792-12a: *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, impressão 3D é um “processo de construção de objetos tridimensionais sólidos, a partir de um modelo 3D, por meio de adição sucessiva de camadas”.

A primeira impressora 3D foi desenvolvida por Charles Hull (co-fundador da empresa americana 3D *systems*) e a técnica de obtenção de peças foi denominada estereolitografia (SL), também conhecida por SLA (*stereolithography apparatus*) (HULL; ARCADIA 1986).

Dentre os materiais que podem ser utilizados para impressão 3D, materiais poliméricos termoplásticos como o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (TYMRAK *et al.*, 2014), (SUN *et al.*, 2008) e ácido polilático (PLA) (TYMRAK *et al.*, 2014), (MELNIKOVA *et al.*, 2014), podem ser processados por esta tecnologia.

Os tipos mais comuns de impressora 3D encontrados são as que utilizam as técnicas estereolitografia (SL) e modelagem por fusão e deposição (FDM) (WONG; HERNANDEZ, 2012). Segundo Takagaki (2012), as impressoras pessoais que estão se difundindo no mercado utilizam a técnica FDM por ser a mais simples e consequentemente mais barata.

Segundo a Sulavik; Waller (2016), as impressoras 3D estão ajudando a impulsionar a transição da produção em massa para a personalização em massa em vários setores da indústria. Isto deve-se ao fato que esta tecnologia se apresenta como uma solução para fabricação de pequenos lotes de produtos complexos, com alto grau de personalização, mesmo em ambientes de produção em massa.

Por ser uma tecnologia insensível a complexidade de peças, tem-se um aumento na flexibilidade de produção, trazendo benefícios em relação ao volume, tempo e custo de produção. Em relação ao desenvolvimento de produtos, possibilita maior liberdade nas etapas de projeto e fabricação de protótipos e também acelera o ciclo de desenvolvimento de produtos até o seu lançamento no mercado, reduzindo desperdícios e tornando este processo mais eficiente (COTTELEER, 2014).

Outro motivo para o interesse das empresas em utilizar a impressão 3D em seus processos de design e engenharia é que a mesma apresenta um conceito de fabricação diferenciado, pois como cada camada do objeto é criada

sequencialmente, isto permite a obtenção de estruturas internas mais complexas que os processos convencionais de moldagem ou fundição (CUNICO, 2014).

Entretanto, mesmo com as vantagens que este processo apresenta em relação aos processos de fabricação convencionais, atualmente a aplicação industrial do processo de impressão 3D ainda enfrenta desafios em relação à alguns aspectos como qualidade da superfície das peças produzidas, exemplo disto são as marcas dos filamentos depositados ou marcas dos degraus de deposição (também chamado de efeito escada) apresentado nas figuras 1 e 2. Devido a estas marcas é necessário realizar um processo de acabamento manual da superfície, como polimento ou pintura com tintas de recobrimento (CUNICO, 2014).

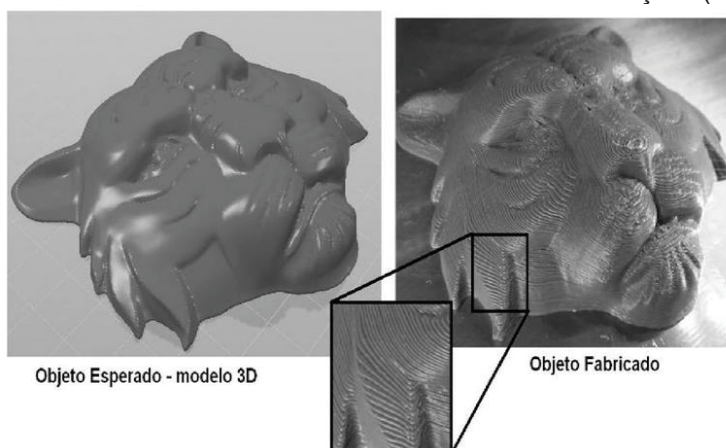
Outra dificuldade encontrada é o custo elevado para produção em massa e limitação no tamanho dos componentes que podem ser impressos dada pela limitação do tamanho da mesa de deposição (SCHLAEPFER *et al.*, 2015).

FIGURA 1 - EXEMPLO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DE PEÇA PRODUZIDA POR IMPRESSÃO 3D FDM



FONTE: Adaptado de Cunico (2014)

FIGURA 2 - EXEMPLO DE MARCAS DE DEGRAUS DE DEPOSIÇÃO (EFEITO ESCADA)



FONTE: Adaptado de Cunico (2014)

Devido a estas dificuldades encontradas neste tipo de processamento, estudos sobre as características dos materiais utilizados para impressão 3D se tornam necessários, para entender o comportamento das peças em relação às variações dos parâmetros do processo e fornecer dados aos utilizadores destas impressoras e assim tornar o processo confiável o suficiente para aplicações industriais (SOOD *et al.*, 2012).

Os trabalhos encontrados na literatura que tem como objetivo entender o comportamento das peças em relação às variações dos parâmetros do processo, tem como foco a precisão dimensional das peças, como realizado por Sood *et al.* (2010), melhorias na rugosidade superficial (AHN *et al.*, 2009) e propriedades mecânicas (SOOD *et al.*, 2009), porém, mesmo o desgaste sendo uma característica importante para a durabilidade das peças, existem poucos trabalhos com objetivo de entender o comportamento tribológico das peças produzidas por impressão 3D (SOOD *et al.*, 2012).

Em relação ao comportamento tribológico de peças produzidas por FDM, Boparai *et al.* (2015) comparou o desgaste entre peças de ABS e Nylon6-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, quando estas são submetidas à desgaste por fadiga. Em outro trabalho, Boparai *et al.* (2016) comparou novamente o desgaste entre peças de ABS e Nylon6-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, desta vez submetendo as peças à desgaste por deslizamento à seco em superfície cerâmica. Em ambos os casos não foi identificado o mecanismo de desgaste atuante, o objetivo foi apenas comparar o desempenho entre os materiais estudados.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Com objetivo de entender o mecanismo que ocorre quando as peças processadas por FDM estão sujeitas a desgaste abrasivo, nenhum estudo significativo foi encontrado e para preencher esta lacuna, o presente trabalho tem como foco o compreender o efeito do parâmetro orientação de impressão no desgaste abrasivo de peças fabricadas por impressão 3D FDM.

## 1.2 OBJETIVOS

Neste item descreve-se o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearam a pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é caracterizar o comportamento tribológico de peças de ABS produzidas por impressão 3D FDM com diferentes parâmetros de processo, quando submetidas a desgaste abrasivo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos tem-se:

- Definir um conjunto de parâmetros para impressão, com base na literatura, os quais atendam critérios de precisão dimensional e qualidade superficial da peça;
- Avaliar o comportamento tribológico das peças analisando-se a perda de volume;
- Avaliar a influência da orientação de impressão no comportamento tribológico das peças submetidas aos ensaios de desgaste;
- Avaliar a influência do aumento da distância de deslizamento nos ensaios de desgaste;
- Identificar o mecanismo de desgaste das peças submetidas aos ensaios.

## 1.3 ESCOPO (DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E LIMITAÇÕES)

Este trabalho procura estabelecer uma relação entre o parâmetro de fabricação orientação de impressão e o comportamento tribológico de peças de ABS, quando estas são submetidas a desgaste abrasivo.

Para isto, foram realizados ensaios de resistência ao desgaste tipo pino sobre disco, utilizando-se o parâmetros estabelecidos pela norma ASTM G99, em

temperatura ambiente, em peças produzidas com acrilonitrila butadieno estireno (ABS) comercial, impressas por modelagem por fusão e deposição nas orientações de impressão horizontal e vertical, utilizando-se parâmetros de impressão encontrados na literatura para este polímero, os quais atendem critérios de precisão dimensional e qualidade superficial da peça.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, encontra-se a fundamentação teórica, em que se apresenta uma revisão de alguns conceitos de impressão 3D, filamentos utilizados neste tipo de processamento e métodos para caracterização de materiais necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

A Impressão 3D, também conhecida por manufatura aditiva, é um processo de construção de objetos tridimensionais sólidos, a partir de um modelo 3D, por meio da adição sucessiva de camadas de material (ASTM INTERNATIONAL, 2013).

Comparando-se com a fabricação subtrativa, que é a forma mais comum utilizada atualmente para construir objetos, na qual as camadas são removidas de um bloco de material até que a forma desejada seja obtida, pode-se dizer que a impressão 3D é o seu oposto, pois neste caso o processo se inicia com um material desarticulado e em seguida cria-se um objeto em três dimensões por meio de um modelo digital (SCHWAB, 2016).

Por muitos anos a manufatura aditiva não esteve tão presente na indústria, devido ao alto custo da tecnologia, que era protegida por patentes e assim somente grandes centros de pesquisa tinham acesso a impressoras 3D, como por exemplo a Ford Motors que foi uma das primeiras indústrias a adotar esta tecnologia na produção de protótipos rápidos para desenvolvimento de produtos. Este cenário começou a mudar a partir de 2009 com a queda da patente da tecnologia de impressão 3D por FDM e com o surgimento de um movimento de colaboração *open source* chamado RepRap, que desenvolveu impressoras 3D de baixo custo. Em 2012 a empresa MakerBot, que na época era de pequeno porte, fabricou as primeiras impressoras 3D de mesa, a qual já era fornecida montada e calibrada pronta para uso, por apenas U\$1749. Devido a este baixo custo e facilidade de acesso, a empresa teve um sucesso de vendas muito grande e em pouco tempo a impressora virou notícia em todos os jornais dos EUA e do mundo da fabricação (SULAVIK; WALLER, 2016).

Com o passar dos anos cada vez mais empresas vem se interessando por este tipo de equipamento, de acordo com o levantamento realizado em 2016 por

Sulavik e o Instituto de Manufatura PwC, mais de dois terços das indústrias de manufatura nos EUA estavam empregando a impressão 3D de alguma maneira. Em 2015, 71% dos fabricantes dos EUA já estavam aplicando a tecnologia de impressão 3D de alguma forma, 4% a mais do que 2014 onde 67% das empresas utilizavam a tecnologia (SULAVIK; WALLER, 2016).

Em relação à utilização da tecnologia no setor industrial o levantamento de Sulavik; Waller (2016) mostrou que uma maior porcentagem dos fabricantes estava utilizando a impressão 3D para prototipagem, cerca de 31,4% dos avaliados e para produtos finais eram cerca de 6,6%. As indústrias que estavam testando a tecnologia representavam 17,4%, percentual abaixo dos dois anos anteriores, quando 28,9% dos avaliados disseram que estavam em fase de “experimentação”, ou seja, uma parcela destas indústrias já haviam avançado para a etapa de utilização da impressão 3D em seus processos produtivos em 2016.

De acordo com Schwab (2016), alguns dos pontos positivos da utilização de impressoras 3D na indústria são o desenvolvimento acelerado de produtos, a redução do ciclo projeto-manufatura, a possibilidade de fabricação de peças com geometria complexa facilmente e o nascimento de uma nova indústria para o fornecimento de materiais de impressão. Porém, tem-se também as desvantagens, dentre as quais podemos citar o aumento de resíduos para eliminação, sobrecarregando mais o meio ambiente, a possibilidade de qualquer inovação poder ser copiada instantaneamente e ocorrendo assim a pirataria.

Existem diversas tecnologias de impressão 3D atualmente, porém todas se baseiam no princípio de fatiar em diversas partes a figura do objeto que se deseja imprimir, obtendo assim finas camadas que serão impressas através do processo de deposição de materiais sólidos. Sobrepondo estas camadas, é obtido o objeto final desejado (TAKAGAKI, 2012).

O processo de impressão se inicia com a criação de um modelo de computador 3D em malha, que é o desenho equivalente ao objeto a ser fabricado, para isto são utilizados *softwares* CAD (computer-aided design) como AutoCAD 3D, SolidWorks, Catia Inventor e Google sketchup Pro. A segunda etapa é a conversão do arquivo do objeto desejado em um formato comum à impressora 3D, o qual normalmente é um arquivo STL (Surface Tessellation Language). O formato STL descreve as superfícies, internas e externas, através do contorno da figura 3D

através de um conjunto de superfícies triangulares de diversas dimensões e formas (TAKAGAKI, 2012).

Após isto, um *software* divide o modelo tridimensional gerado em diversas camadas finas, sempre paralelas ao plano de referência escolhido e dispostas umas sobre as outras, este processo é chamado de fatiamento do arquivo e por fim gera-se o código G (G-code), o qual é enviado para a impressora que realiza a impressão de consecutivas camadas do objeto (WANG *et al.*, 2017)(TAKAGAKI, 2012).

FIGURA 3 – PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D



FONTE: Adaptado de Mousta Impressoras 3D (2020)

Os materiais utilizados para a impressão podem ser metais, polímeros, cerâmicas e compósitos, porém o mais utilizados são os plásticos de engenharia, como ABS, PLA, entre outros (TAKAGAKI, 2012).

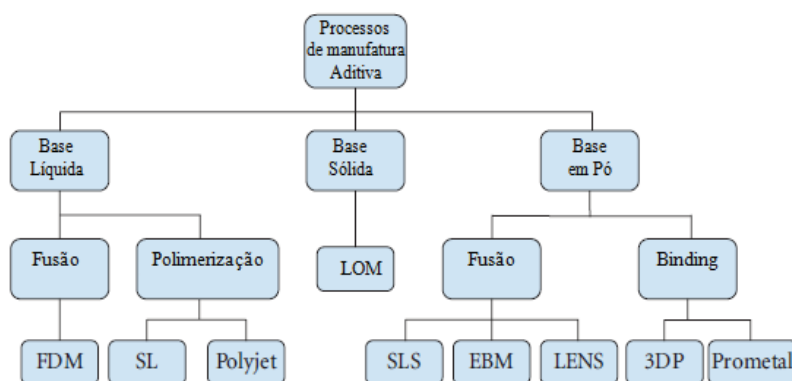
Em relação às suas aplicações, por exemplo, pode-se ser utilizada a impressão 3D de polímeros nas indústrias aeroespaciais para a criação de estruturas leves e complexas (KROLL; ARTZI, 2011), na arquitetura para criar maquetes e modelos estruturais (JAHANGIR *et al.*, 2018) e também em campos médicos para impressão de próteses personalizadas ao invés de utilizar produtos *off-the-shelf* que fazem uma aproximação grosseira das necessidades reais do paciente (MURPHY; ATALA, 2014).

Atualmente a principal aplicação das impressoras 3D está nos setores de desenvolvimento de produtos, devido à possibilidade de criar protótipos reais, em pouco tempo e a custos aceitáveis e estes poderem ser testados com relação à sua forma, peso, ergonomia, resistência, cores ou encaixe de peças, reduzindo os erros de projeto a praticamente zero (TAKAGAKI, 2012).

### 2.1.1 Métodos de impressão 3D

Na figura 4, apresenta-se uma visão geral dos diferentes processos de manufatura aditiva.

FIGURA 4 - PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA



FONTE: Adaptado de Wong; Hernandez (2012)

De acordo com Wong; Hernandez (2012), em relação aos tipos de impressoras, a distinção entre eles reside essencialmente em dois aspectos, que são o modo como as camadas de material são depositadas e o tipo de material utilizado. O quadro 1 apresenta um resumo de alguns métodos.

QUADRO 1 – RESUMO DOS MÉTODOS DE IMPRESSÃO 3D

<b>Método</b>	<b>Matérias-primas</b>	<b>Materiais tipicamente utilizados</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>
FDM	Filamento	Termoplásticos como ABS, PLA e Nylon	Extrusão e deposição
DWI	Filamento	Materiais metálicos e cerâmicos	Extrusão e deposição
SLA	Fotopolímero líquido	Resina fotocurável (resina à base de epóxi ou acrilato)	Varredura a laser e cura induzida por UV
SLS	Pó	PCL e poliamida em pó	Sinterização induzida por calor
DMLS	Pó	Ligas metálicas	Sinterização induzida por laser
LOM	Sólido	Papel, materiais plásticos e metálicos	Camadas de folhas com material adesivo cortadas por laser

FONTE: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

As tecnologias que utilizam o modo de extrusão são *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Direct Ink Writing* (DIW), são caracterizadas pela fusão do material, seguida de extrusão do mesmo através de um bico. A diferença entre as duas impressoras é o tipo de material utilizado, no caso da FDM são usados essencialmente termoplásticos e elastômeros e no caso da DIW são utilizados materiais cerâmicos e ligas metálicas (UPCRAFT; FLETCHER, 2003)(MANÇANARES *et al.*, 2015) .

Em relação ao modo de polimerização, tem-se a estereolitografia. Nesta tecnologia o material está inicialmente no estado líquido dentro de uma cuba e cada camada da peça é formada pelo endurecimento deste material através do efeito fotoquímico, ou seja, ele se solidifica sob efeito da luz, que neste caso é um feixe de laser ultravioleta que ilumina o polímero líquido nos pontos onde o objeto deverá ser solidificado. No final do processo, após a drenagem do polímero líquido que está na cuba, tem-se o objeto tridimensional sobre a plataforma (LAN *et al.*, 1997).

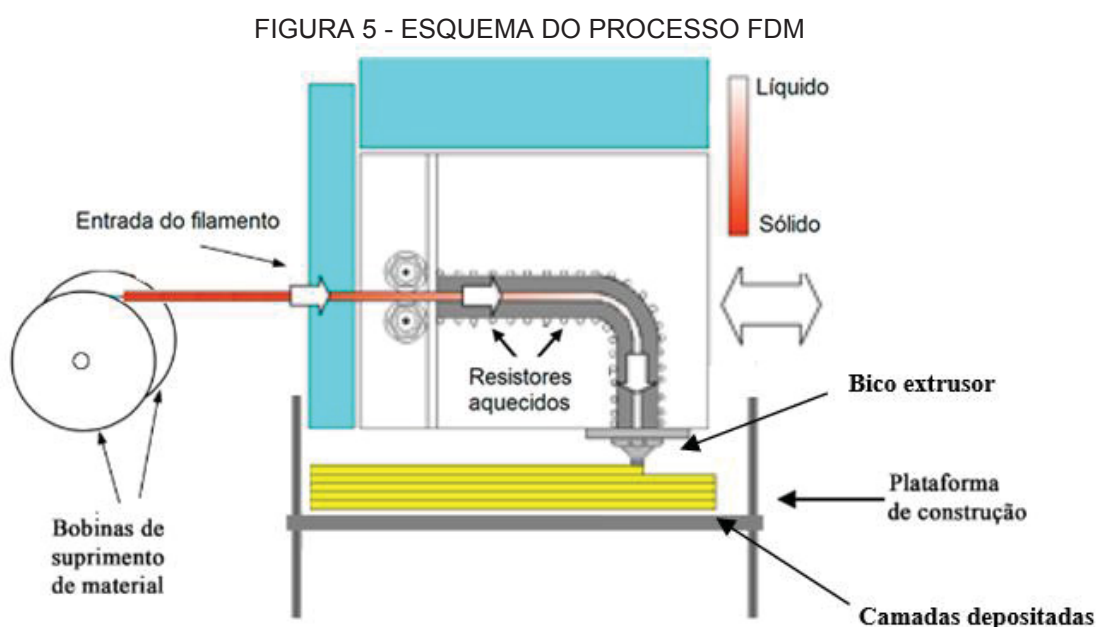
As tecnologias que utilizam o modo de sinterização são várias, onde pode-se destacar o *Selective Heat Sintering* (SHS), o *Selective Laser Sintering* (SLS) e o *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), e neste modo o material está na forma de pó. A maneira como o pó é sinterizado depende da tecnologia usada. No SHS, uma cabeça de impressão térmica gera o calor necessário à sinterização do material. No SLS e no DMLS, este calor é gerado por um feixe de laser. O material utilizado também depende da tecnologia. No SHS é apenas utilizado o termoplástico. No SLS podem ser usados termoplásticos, metais e cerâmicos. No DMLS são apenas usadas ligas metálicas (MANÇANARES *et al.*, 2015).

Dentro do modo de impressão que utiliza o material na forma sólida, destaca-se a *Laminated Object Manufacturing* (LOM). Este modo caracteriza-se por o material ser em forma de folhas impregnadas com material adesivo, onde cada folha representa uma camada. As folhas são adicionadas a medida que um laser corta a geometria correspondente a camada. Em relação aos materiais utilizados, destacam-se o papel, materiais metálicos e plásticos (PALERMO, 2013).

### 2.1.2 Tecnologia FDM – funcionamento do processo

Neste processo a matéria prima plástica é geralmente fornecida em forma de filamento. Para ocorrer a fusão do material, resistores mantêm o plástico a uma temperatura logo acima de seu ponto de fusão, de modo que ele flua facilmente através do bico e forme a camada (NOVAKOVA-MARCINCINOVA; KURIC, 2012).

A figura 5 apresenta o esquema do processo FDM, onde pode-se visualizar a entrada do filamento plástico na impressora, a passagem do mesmo pelos resistores e sua deposição na plataforma de construção pelo bico extrusor formando as camadas depositadas.



FONTE: Adaptado de Singh et al. (2017)

Na primeira fase de impressão ocorre a delimitação do contorno da base da peça, em seguida o bico de deposição cobre o interior do contorno da base da peça com o plástico e tem-se a primeira camada de material. Após isto, o bocal de impressão sobe milimetricamente, repetindo o processo depositando novas camadas. Este processo é repetido tantas vezes quanto for necessário, até que seja obtida a forma final da peça, devido a isto, dependendo da complexidade e dimensão da peça, são necessárias várias camadas e assim o processo pode levar horas ou dias (NOVAKOVA-MARCINCINOVA; KURIC, 2012).

### 2.1.3 Variáveis do processo FDM

De acordo com Volpato (2007) dentre as principais variáveis controladas na execução do processo FDM, estão a orientação de impressão, temperatura de impressão (temperatura do bico de extrusão), ângulo de varredura, temperatura da plataforma, velocidade de impressão (velocidade na qual a plataforma de impressão e o conjunto de extrusão se movimentam), altura da camada depositada, densidade de enchimento e padrão de preenchimento. Tais especificações influenciam diretamente as características do produto e qualidade da impressão.

#### 2.1.3.1 Orientação de impressão

A orientação de impressão define o ângulo que a peça faz com a base de construção, é a orientação da peça na plataforma de construção em relação aos seus eixos X, Y e Z. X e Y são os eixos paralelos à plataforma, e Z é a direção de construção das peças. Devido à natureza tipicamente anisotrópica dos componentes fabricados por FDM, este parâmetro terá influência na resistência mecânica das peças (BAGSIK, 2011).

FIGURA 6 - EXEMPLOS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO VERTICAL E HORIZONTAL



FONTE: A autora (2020)

A figura 6 apresenta dois exemplos de orientações de impressão que pode-se utilizar, sendo elas horizontal e vertical.



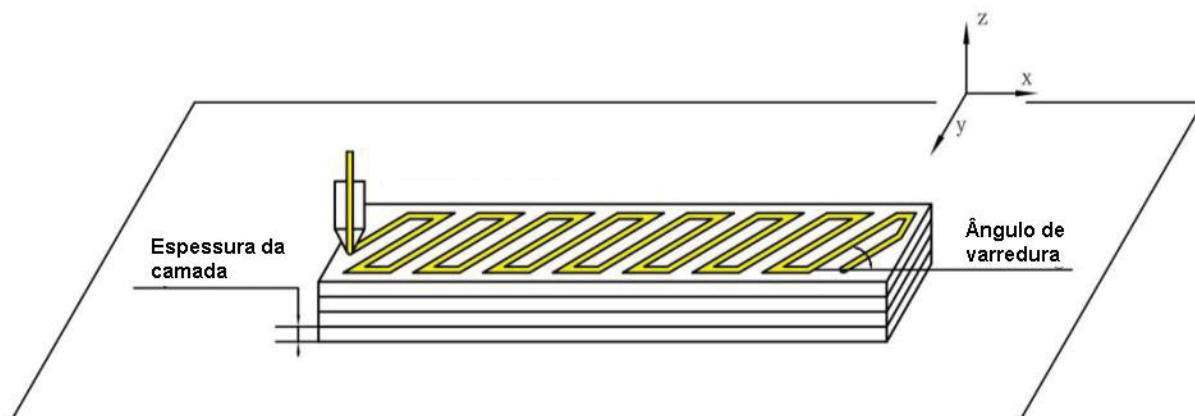
### 2.1.3.2 Temperatura de extrusão

É a temperatura utilizada para a deposição do material durante o processo. De acordo com Bellini (2002), a temperatura de extrusão deve ser ajustada de acordo com as propriedades reológicas (por exemplo a relação entre viscosidade e temperatura) e com a temperatura de fusão do material termoplástico utilizado para a impressão. O ajuste deve ser realizado com objetivo de alcançar baixa viscosidade do material fundido na região de aquecimento, a fim de facilitar a extrusão através do bico e amolecer a camada previamente depositada para assegurar a força de união entre as camadas.

### 2.1.3.3 Ângulo de varredura

O ângulo de varredura, ou também chamado de ângulo de *raster*, define a trajetória que o bico extrusor faz ao longo da base de impressão, é o angulo em que as linhas serão feitas para formar uma camada, conforme pode ser observado na figura 7 (WU *et al.*, 2017).

FIGURA 7 – ESQUEMA DE IMPRESSÃO APRESENTANDO O ÂNGULO DE VARREDURA



FONTE: Adaptado de Wu et al. (2017)

Na prática é preferível utilizar ângulos de varredura menores, pois a utilização de ângulos de varredura grandes resulta na construção de filamentos longos, o que promoverá o acumulo de tensões ao longo da direção de construção, gerando distorções e baixa adesão entre os filamentos depositados (SOOD *et al.*, 2010).

#### 2.1.3.4 Espessura da camada

É uma medida da altura de cada camada em relação ao eixo Z e é especificada pelo fabricante da impressora. Esta variável do processo está diretamente ligada com a qualidade da peça. Quanto menor a altura escolhida, maior será a qualidade superficial, porém maior o tempo de impressão final.



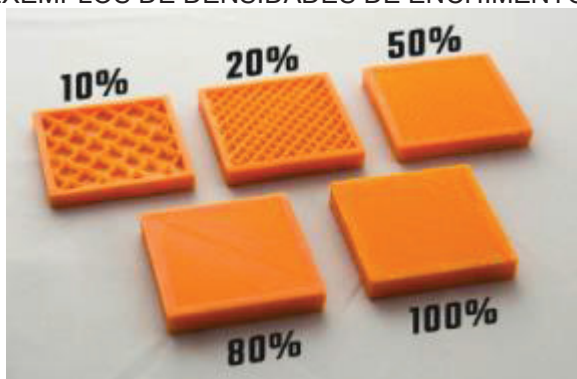
FONTE: Adaptado de Moustá Impressoras 3D (2020)

A figura 8 apresenta a superfície lateral de peças com três diferentes espessuras de camada, de menores para maiores, respectivamente da esquerda para direita. Pode-se visualizar que quanto menor a espessura de camada, maior a qualidade superficial da peça pois esta apresenta-se com menos irregularidades.

#### 2.1.3.5 Densidade de preenchimento

É a quantidade de material impresso que a peça terá no interior, podendo variar de 0% até 100%, sendo estes percentuais correspondentes a um objeto oco e um objeto totalmente preenchido, respectivamente, conforme pode ser observado na figura 9.

FIGURA 9 – EXEMPLOS DE DENSIDADES DE ENCHIMENTO DIFERENTES



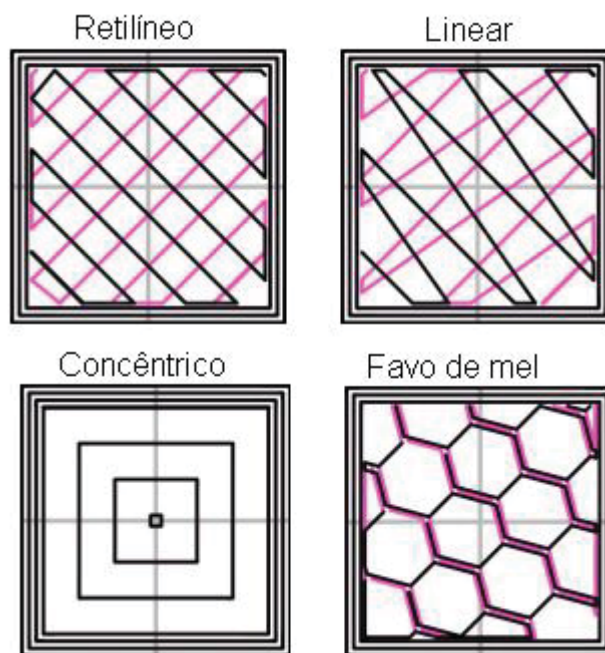
FONTE: Adaptado de Impressão 3D Portugal (2018)

Segundo Gomez-Gras et al. (2018), esta variável tem influência significativa na resistência mecânica de peças poliméricas produzidas por impressão 3D, sendo que quanto maior a densidade de preenchimento, mais resistente a peça será.

#### 2.1.3.6 Padrão de preenchimento

Esta variável está relacionada com o tipo de movimentação realizada no preenchimento interno da peça. Algumas das opções utilizadas são os modos retilíneo, linear, concêntrico e favo de mel (*honeycomb*). A figura 10 apresenta exemplos destes tipos de padrão de preenchimento.

FIGURA 10 - VISTA SUPERIOR DOS TIPOS DE PADRÃO DE PREENCHIMENTO RETILÍNEO, LINEAR, CONCÊNTRICO E FAVO DE MEL



FONTE: Adaptado de Hodgson et al. (2018)

O padrão de preenchimento retilíneo é normalmente o mais utilizado e é caracterizado por camadas com uma sequência de linhas diagonais, de acordo com o ângulo de varredura, em relação ao eixos X e Y, que se cruzam a 90 graus com a outra camada, formando assim uma malha de pequenos quadrados. Este tipo de preenchimento garante resistência mecânica, rapidez de impressão e consumo moderado de matéria prima (PORSANI et al., 2017).

No caso do padrão de preenchimento linear, ele se assemelha muito ao retilíneo, a diferença entre eles está no fato de que as linhas diagonais entre as

camadas não são paralelas entre si, elas possuem uma leve angulação, criando o formato de zig zag. É considerada uma estrutura rápida de impressão, porém não recomendada para objetos que serão submetidos a forças mecânicas, pois seu tipo de malha é não uniforme (PORSANI *et al.*, 2017).

As estruturas formadas a partir de padrões de preenchimento concêntricos, são criadas a partir do centro do objeto, onde tem-se sucessivas camadas seguindo a geometria da parede externa da peça. É um padrão de preenchimento que possibilita velocidades de impressão rápidas, porém as peças apresentam-se mais frágeis à testes físicos, já que suas paredes internas não formam malha e também não entram em contato entre si e nem com a parede externa (PORSANI *et al.*, 2017).

O padrão de preenchimento favo de mel, apresenta uma malha muito resistente mecanicamente, formada por hexágonos, seguindo a geometria de favos de mel. Sua desvantagem é o maior consumo de matéria prima e tempo de impressão comparada com os demais padrões de preenchimento, porém garante resistência e solidez (PORSANI *et al.*, 2017).

#### 2.1.3.7 Temperatura da plataforma

A distribuição de calor na peça é afetada pela distância entre a plataforma de construção e parte mais alta da peça. Nas impressões em que é utilizada plataforma aquecida, as camadas inferiores serão mais quentes que as superiores, isto se deve à diferença de área de transferência de calor entre parte superior e inferior da peça (a área de contato da peça com a plataforma aquecida é maior do que a área de contato da peça em qualquer ponto, com o bico de extrusão). Este diferencial de calor pode introduzir tensões residuais e causar deformações na peça, devido a isto torna-se necessário o controle deste parâmetro (MESSIMER *et al.*, 2019).

#### 2.1.3.8 Velocidade de impressão

Velocidade de impressão é a velocidade na qual a plataforma de impressão e/ou o conjunto de extrusão se movimentam durante os movimentos de deposição de material. Segundo Yuan (2008), as velocidades de impressão, juntamente com as

dimensões do bico extrusor, influenciam a taxa de material extrudido e a espessura do filamento depositado.

A figura 11 apresenta testes realizados por Yuan (2008) com diferentes velocidades de impressão, onde pode-se verificar que, para maiores velocidades de impressão tem-se menor vazão de material polimérico pelo bico extrusor e consequentemente a espessura do filamento depositado é menor.

FIGURA 11 – ESPESSURA DO FILAMENTO DEPOSITADO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE IMPRESSÃO



(a) velocidade de impressão = 2 mm/s



(b) velocidade de impressão = 3 mm/s



(c) velocidade de impressão = 4 mm/s



(d) velocidade de impressão = 5 mm/s

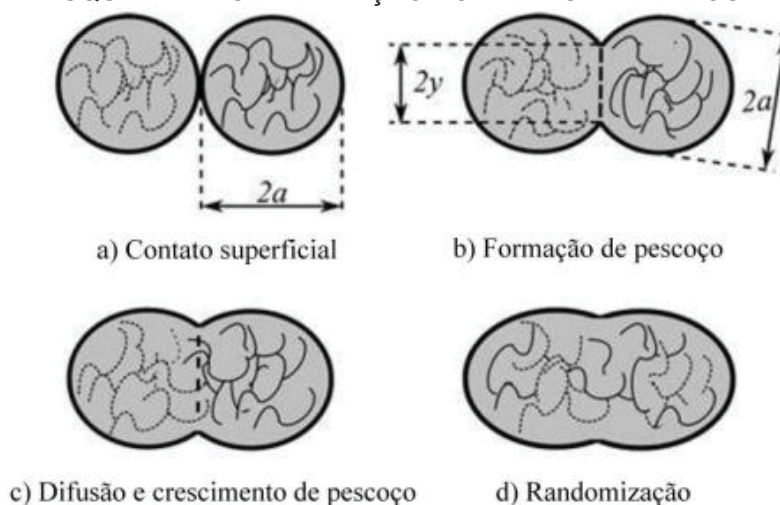
FONTE: Adaptado de Yuan (2008)

#### 2.1.3.9 União entre as camadas

Além das variáveis do processo, a união entre as camadas da peça têm influência significativa no comportamento final da peça. Este processo de união das camadas durante a construção da peça é chamado de sinterização polimérica e ocorre através de fluxo viscoso e difusão molecular de cadeias poliméricas através da interface entre duas seções esféricas, até serem randomizadas, conforme

apresentado na figura 12 para filamentos de raio  $a$  e comprimento de pescoço  $2y$  (TURNER *et al.*, 2014).

FIGURA 12 - ESQUEMA DA SINTERIZAÇÃO POLIMÉRICA ENTRE OS FILAMENTOS



FONTE: Adaptado de Turner et al. (2014)

## 2.2 POLÍMEROS

Segundo Callister; Renthwisch (2012) os polímeros compreendem os materiais comuns de plástico, borracha. Muitos deles são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, hidrogênio e em outros elementos não metálicos, além disso, eles possuem estruturas moleculares muito grandes. Estes materiais possuem tipicamente baixas densidades e podem ser extremamente flexíveis.

Polímeros é uma palavra originária do grego que significa: poli (muitos) e meros (partes). São macromoléculas formadas por moléculas pequenas (monômeros) que se ligam por meio de uma reação denominada polimerização, realizada mediante reações químicas. Um material polimérico pode ser considerado como constituído por várias partes ligadas quimicamente entre si de modo a formar um sólido. Quanto à sua estrutura, a maioria dos materiais poliméricos é amorfa, mas, no entanto, alguns são constituídos de misturas de regiões cristalinas e amorfas. (MANO, 1991).

Os polímeros que ocorrem naturalmente, aqueles que são derivados de plantas e animais, têm sido usados por muitos séculos, esses materiais incluem a madeira, borracha, o algodão, a lã, o couro e a seda. Outros polímeros naturais, como as proteínas, as enzimas, os amidos e a celulose, são importantes em



processos biológicos e fisiológicos, nas plantas e nos animais (CALLISTER; RENTHWISCH, 2012).

Ferramentas modernas de pesquisa científica tornaram possível o desenvolvimento de numerosos polímeros, os quais são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. Muitos dos plásticos, borrachas e materiais fibrosos que nos são úteis nos dias de hoje consistem em polímeros sintéticos (CALLISTER; RENTHWISCH, 2012).

Os polímeros sintéticos, dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente, dividem-se em duas classes que são os termoplásticos e os termorrígidos. Os termoplásticos são moldáveis com a variação da temperatura, possuem uma massa molar elevada e devem ser reciclados, pois não são decompostos com facilidade pela natureza. Já os termorrígidos resistem a variações térmicas, não permitindo seu reprocessamento, além de possuírem uma baixa massa molar. Os termoplásticos, de acordo com sua durabilidade e desempenho, podem ser convencionais ou de engenharia. São exemplos de termoplásticos de engenharia: o policarbonato, utilizado na fabricação de CD, janelas de aeronaves e ginásios de esportes, e as poliamidas, náilons usados em engrenagens plásticas e tecidos impermeáveis. Os termoplásticos convencionais são encontrados principalmente nas embalagens plásticas como garrafas, copos descartáveis, potes e sacos plásticos (MANO, 1991).

De fato, desde o fim da Segunda Guerra Mundial, o campo dos materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento dos polímeros sintéticos. Os materiais sintéticos podem ser produzidos de maneira barata e as suas propriedades podem ser administradas num nível em que muitas delas são superiores às suas contrapartes naturais (CALLISTER; RENTHWISCH, 2012).

### 2.2.1 Filamentos para modelagem FDM

Para a impressão 3D FDM, são utilizados materiais com baixo ponto de fusão (entre 68 °C e 270 °C) e baixa condução térmica e sendo assim, as resinas termoplásticas mais adequadas a este processo incluem poliéster, PP, ABS, ácido polilático (PLA), policarbonato (PC), PA, elastômeros e ceras (EBEWELE, 1996).



### 2.2.1.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno

O copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS) se trata de um material termoplástico derivado de petróleo e de ampla utilização, considerado a matéria prima principal da tecnologia FDM, apresenta aparência fosca e uma grande gama de cores opacas (PORSANI *et al.*, 2017).

De acordo com Gordon (2015) juntos, PLA e ABS representam 70% das peças fabricadas por impressão 3D utilizando-se termoplásticos.

Os motivos para o ABS ser o filamento termoplástico mais utilizado na tecnologia FDM, são a facilidade de extrusão a altas temperaturas (estabilidade a diferentes temperaturas), combinado com as boas propriedades mecânicas que confere às peças, como por exemplo, resistência ao impacto e resistência química, além de baixo custo (EBEWELE, 1996).

É um polímero considerado ideal para utilização na produção de uma grande diversidade de peças como protótipos funcionais, que necessitam de resistência à temperatura e à impacto, que precisem de flexibilidade para encaixes ou que se pretenda realizar posterior acabamento. Pode ser lixado e usinado com facilidade, sendo solúvel em acetona quando mergulhado ou vaporizado rapidamente, o que o torna brilhante e liso (PORSANI *et al.*, 2017).

O ABS apresenta a seguinte fórmula química  $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$ . O resultado físico deste copolímero é um material termoplástico rígido e leve, com alguma flexibilidade e resistência na absorção de impacto. Este termoplástico amorfo, apresenta baixa temperatura de transição vítrea (entre 105 e 107 °C) o que facilita a sua manipulação. Apresenta uma vasta gama de aplicações, desde tubagens, interiores de veículos, injeção de moldes, capacetes de segurança, e tacos de golfe (EBEWELE, 1996).

Existem diferentes tipos de ABS, onde cada monômero está associado a uma determinada propriedade, as resistências térmica e química do polímero dependem do acrilonitrilo, enquanto a sua moldabilidade, brilho e rigidez são desenvolvidos através do butadieno. Resistência ao impacto e alongamento são contribuições do estireno. Deste modo, é possível encontrar um grande intervalo de valores de certas propriedades mecânicas. Na tabela 1 encontram-se os valores médios das principais propriedades deste termoplástico.

TABELA 1 – PROPRIEDADES DO ABS

<b>Propriedade</b>	<b>Valor (unidade)</b>
Densidade	1,01 - 1,04 (g/cm <sup>3</sup> )
Resistência à tração	33,1 - 43,4 (MPa)
Módulo de elasticidade	1586 - 2275(MPa)
Resistência à flexão	55,2 - 75,8 (MPa)
Módulo de flexão	1724 - 2413 (MPa)
Força de impacto Izod	3,0 - 12 (ft-lb/in notch)
Alongamento na ruptura	5 – 70
Temperatura de transição vítrea	102 - 107 (°C)
Temperatura de fusão	190 - 200 (°C)

FONTE: Adaptado de Ebewele (1996)

## 2.3 TRIBOLOGIA

O termo tribologia vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) e foi utilizado, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Jost definiu tribologia como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (JOST, 1990).

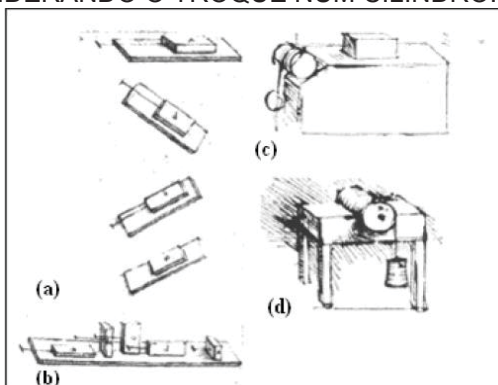
Neste relatório Jost apresentou os impactos econômicos devido à utilização dos conhecimentos de tribologia e sua estimativa foi de que mediante o uso do conhecimento existente podem-se reduzir as perdas por desgaste em 20% (JOST, 1990).

O desgaste é definido por Yamaguchi (1990) como “perda progressiva de material da superfície operacional de um corpo, como resultado do movimento relativo desta”. Em outras palavras, é a remoção de material de um sólido como consequência de ação mecânica.

Leonardo da Vinci deu importantes contribuições para o aprendizado dos fenômenos de atrito e desgaste. Através de seus estudos ele mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados, demonstrou que estas são dependentes da força normal ao deslizamento dos corpos e independentes da área de contato aparente, propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento e introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal (ZUM GAHR, 1987).

A figura 13 mostra os desenhos dos equipamentos desenvolvidos por da Vinci para a determinação da força de atrito. Estes, constituem-se nos primeiros tribômetros documentados na história da civilização. Outras contribuições importantes foram: estabelecer a importância dos lubrificantes para diminuir a força de atrito; considerar o efeito da rugosidade no deslizamento e demonstrar que a interposição de esferas (ou objetos que permitem rolamento, como pedras e galhos) entre corpos diminui a resistência ao movimento (SINATORA, 2005).

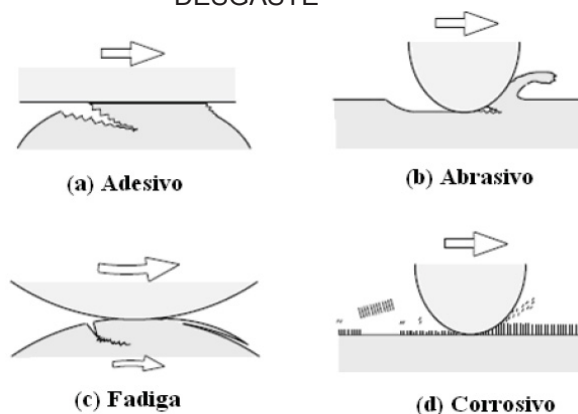
FIGURA 13 - TRIBÔMETROS, DESENVOLVIDOS POR LEONARDO DA VINCI, PARA A DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE ATRITO: (A) EM SUPERFÍCIES HORIZONTAIS E INCLINADAS; (B) CONSIDERANDO O EFEITO DA ÁREA APARENTE; (C) UTILIZANDO UMA POLIA; E (D) CONSIDERANDO O TROQUE NUM CILINDRO.



FONTE: Adaptado de Sinatora (2005)

De acordo com Kato; Adachi (2001), o principal foco de estudo da tribologia é o desgaste. Tradicionalmente são aceitos quatro modos de desgaste, são eles: desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo, os quais estão representados na figura 14.

FIGURA 14 - DESENHO ESQUEMÁTICO DOS QUATRO MODOS REPRESENTATIVOS DE DESGASTE



FONTE: Adaptado de Kato; Adachi (2001)

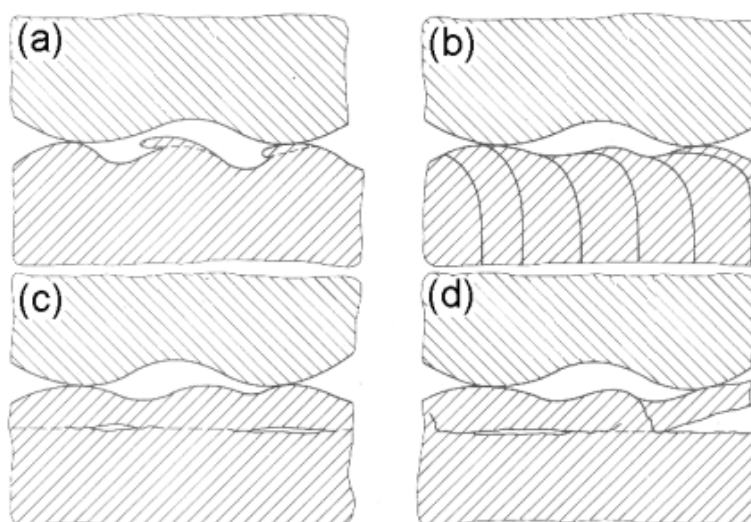
### 2.3.1 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies relativamente lisas friccionam e devido à ligação adesiva entre as superfícies ser suficientemente forte para resistir a deslizamento, fragmentos são arrancados. Posteriormente, os fragmentos aderidos a uma superfície, podem se destacar e voltar a superfície inicial ou podem ser convertidos diretamente em resíduos de desgaste (YAMAGUCHI, 1990).

No momento em que as superfícies são friccionadas, como resultado da adesão, tem-se uma deformação plástica causada na região de contato que faz com que ocorra uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material (KATO; ADACHI, 2001).

Suh (1973) resumiu o mecanismo de desgaste adesivo em quatro etapas: alisamento da superfície do material de menor dureza; acumulação de deformação abaixo da superfície; formação de trincas sub-superficiais e formação de uma partícula de desgaste com a forma de uma lâmina, as quais são apresentadas na figura 15.

FIGURA 15 – ETAPAS DO MECANISMO DE DESGASTE POR ADESÃO: (A)ALISAMENTO DA SUPERFÍCIE DO MATERIAL DE MENOR DUREZA; (B)ACUMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO ABAIXO DA SUPERFÍCIE; (C)FORMAÇÃO DE TRINCAS SUB-SUPERFICIAIS; (D)FORMAÇÃO DE UMA PARTÍCULA DE DESGASTE COM A FORMA DE UMA LÂMINA



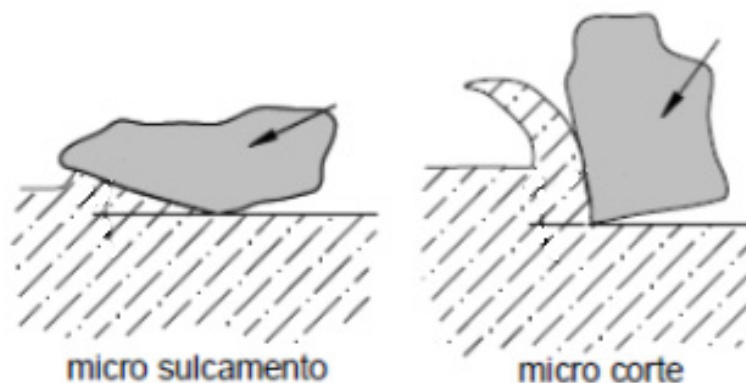
FONTE: Adaptado de Suh (1973)

### 2.3.2 Desgaste abrasivo

De acordo com Zum Gahr (1987) o desgaste abrasivo, também chamado de desgaste por riscamento ou ranhuramento, é o desgaste que ocorre devido à penetração de partículas duras ou asperezas da superfície de um contra-corpo duro em superfícies mais “moles” de um sólido em contatos de deslizamento. Em outras palavras, ocorre quando uma superfície dura e irregular, fricciona contra outra mais macia, gerando assim o arranchamento de material da superfície mais macia.

Os mecanismos de deformação plástica envolvidos na abrasão podem ocorrer de duas formas: micro-corte e micro-sulcamento, os quais são apresentados na figura 16. Nestes não há remoção de material da superfície, o material escoou abaixo da partícula e forma cristas laterais – riscos na direção do deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

FIGURA 16 – MICRO SULCAMENTO E MICRO CORTE, DECORRENTES DO DESGASTE ABRASIVO

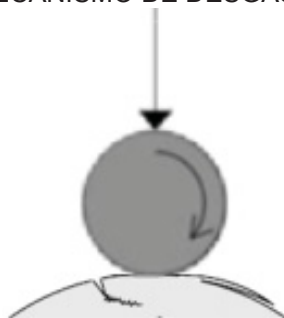


FONTE: Adaptado de Zum Gahr (1987)

### 2.3.3 Desgaste por fadiga

O desgaste devido à fadiga é caracterizado pela formação de trincas com posterior lascamento do material, conforme ocasionado pela alternância repetitiva de aplicação de tensão na superfície, conforme é apresentado na figura 17 (KATO; ADACHI, 2001).

FIGURA 17 – MECANISMO DE DESGASTE POR FADIGA



FONTE: Adaptado de Kato; Adachi (2001)

De acordo com Yamaguchi (1990), trincas sub-superficiais se propagam paralelas à superfície e quando estas alcançam a superfície geram-se partículas de desgaste por delaminação. Em geral esta delaminação da superfície se deve à ação simultânea da adesão, abrasão e fadiga.

#### 2.3.4 Desgaste corrosivo

Finalmente, o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida (KATO; ADACHI, 2001).

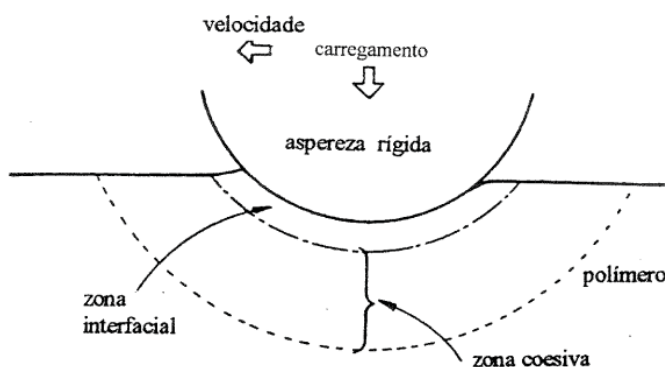
Os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Os mecanismos de desgaste são descritos pela consideração de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre através de mais de um modo, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante (PETERSON; WINER, 1981).

#### 2.4 COMPORTAMENTO DE DESGASTE POLIMÉRICO

De acordo com Santiner; Czichos (1989), o uso de polímeros como recobrimentos é também uma consequência de intensas pesquisas de seu comportamento de desgaste. Os polímeros são muito usados em componentes de engenharia como engrenagens e eixos, onde a propriedade de lubrificação é muito explorada, evitando-se a necessidade de óleo ou graxa.

O desgaste em polímeros pode ser dividido em duas classes: desgaste interfacial e desgaste coesivo. Cada uma está associada à maneira que o sistema dissipa a energia gerada e como o mecanismo de desgaste que ocorre a partir desta interação (BRISCOE, 1981). Um esquema destas duas classes de desgaste é apresentado na figura 18.

FIGURA 18 - DUAS CLASSES GERAIS DE DESGASTE POLIMÉRICO: INTERFACIAL E COESIVO



FONTE: Adaptado de Briscoe (1981)

Na classe de desgaste interfacial se enquadram os casos em que a energia gerada pelo processo de desgaste é dissipada em zonas muito próximas à interface de contato entre o corpo e o contra-corpo, resultando em elevadas densidades de energia. Neste caso, o mecanismo de desgaste mais pronunciado é o desgaste adesivo, onde tem-se a transferência de material polimérico para a outra superfície do contra corpo e este pode ser removido posteriormente como partículas de desgaste (HUTCHINGS, 1992).

Na classe de desgaste coesivo se enquadram os casos em que a dissipação de energia ocorre em camadas mais profundas do polímero, pois a zona deformada engloba a superfície e subsuperfície do material. Neste caso os mecanismos de desgaste mais pronunciados são o desgaste abrasivo ou por fadiga. No caso do desgaste abrasivo, este é resultante da deformação plástica do polímero e no caso do desgaste por fadiga este é devido à deformação elástica devido ao crescimento de trinca na região deformada. A deformação plástica ocorre devido às protuberâncias afiadas das superfícies do abrasivo e o resultado é o surgimento de riscos longitudinais no sentido do deslizamento na superfície desgastada. Já a deformação elástica é proveniente da interação de asperidades arredondadas das partículas duras, particularmente em elastômeros, e perfis na forma de escamas,

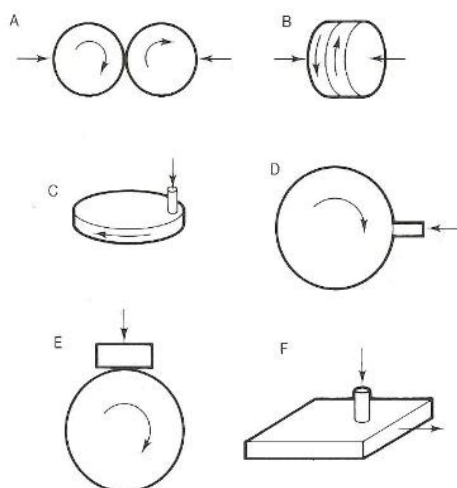
perpendiculares a direção de deslizamento podem ser observados (HUTCHINGS, 1992)(BRISCOE, 1981).

## 2.5 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO DESGASTE

Quando é realizada uma análise do desgaste em laboratório, normalmente tenta-se avaliar dois fatores distintos: mecanismos segundo os quais o desgaste ocorre, ou simular aplicações práticas a fim de fornecer informações úteis para o projeto de um sistema (HUTCHINGS, 1992).

De acordo com Hutchings (1992) os equipamentos utilizados para medir o desgaste podem ser divididos em dois grupos: aqueles que possuem as superfícies de deslizamento dispostas simetricamente, em que os coeficientes de desgaste para materiais idênticos devem ser os mesmos e aqueles mais comumente observados, de sistema assimétrico, em que os dois corpos, mesmo que sejam do mesmo material, apresentarão taxas de desgaste diferentes. A figura 19 mostra exemplos dos ensaios simétricos e assimétricos.

FIGURA 19 - GEOMETRIAS USADAS NOS TESTES DE ENSAIO POR DESLIZAMENTO. (A) ANEL-ANEL AO LONGO DE UMA LINHA; (B) ANEL-ANEL FACE-A-FACE. (C) PINO-DISCO NA SUPERFÍCIE; (D) PINO-DISCO SOBRE A CURVATURA; (E) BLOCO-ANEL; (F) PINO-PLANO



FONTE: Adaptado de Hutchings (1992)

Arranjos simétricos de equipamentos são normalmente aplicados para simular sistemas observados na prática. Já o grupo de ensaio assimétrico é muito utilizado para o estudo do desgaste propriamente dito. O mais comum desse grupo é o teste do pino sobre disco (HUTCHINGS, 1992).

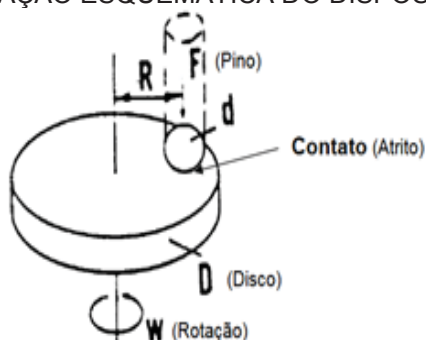


### 2.5.1 Ensaio de desgaste pino sobre disco

De acordo com a norma ASTM International (2017) G99, esta técnica de ensaio é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos com áreas reduzidas. Um pino com ponta arredondada é posicionado perpendicularmente ao disco circular plano. A máquina de teste faz com que a amostra de disco ou a amostra de pino girem em torno do centro do disco. Em ambos os casos, o caminho deslizante é um círculo na superfície do disco. A amostra de pino é pressionada contra o disco com uma carga específica geralmente por meio de um braço ou alavanca e pesos conectados. A máquina deve estar equipada com um contador de voltas ou seu equivalente, que registrará o número de voltas do disco e também desligará a máquina após o número pré-selecionado de voltas. A determinação do desgaste é feita por meio da análise de perda de volume em milímetros cúbicos. A quantidade de desgaste é determinada pesando ambos os espécimes antes e depois do teste. Se a perda de massa for medida, o valor de perda de massa é convertido em perda de volume (em milímetros cúbicos) usando um valor apropriado para a densidade da amostra. Para ensaio com análise de dimensão do disco deve-se assumir que o desgaste do pino seja desprezível.

A figura 20 ilustra o funcionamento teórico do dispositivo utilizado para o ensaio.

FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO DISPOSITIVO PINO SOBRE DISCO



FONTE: ASTM International (2017) G99

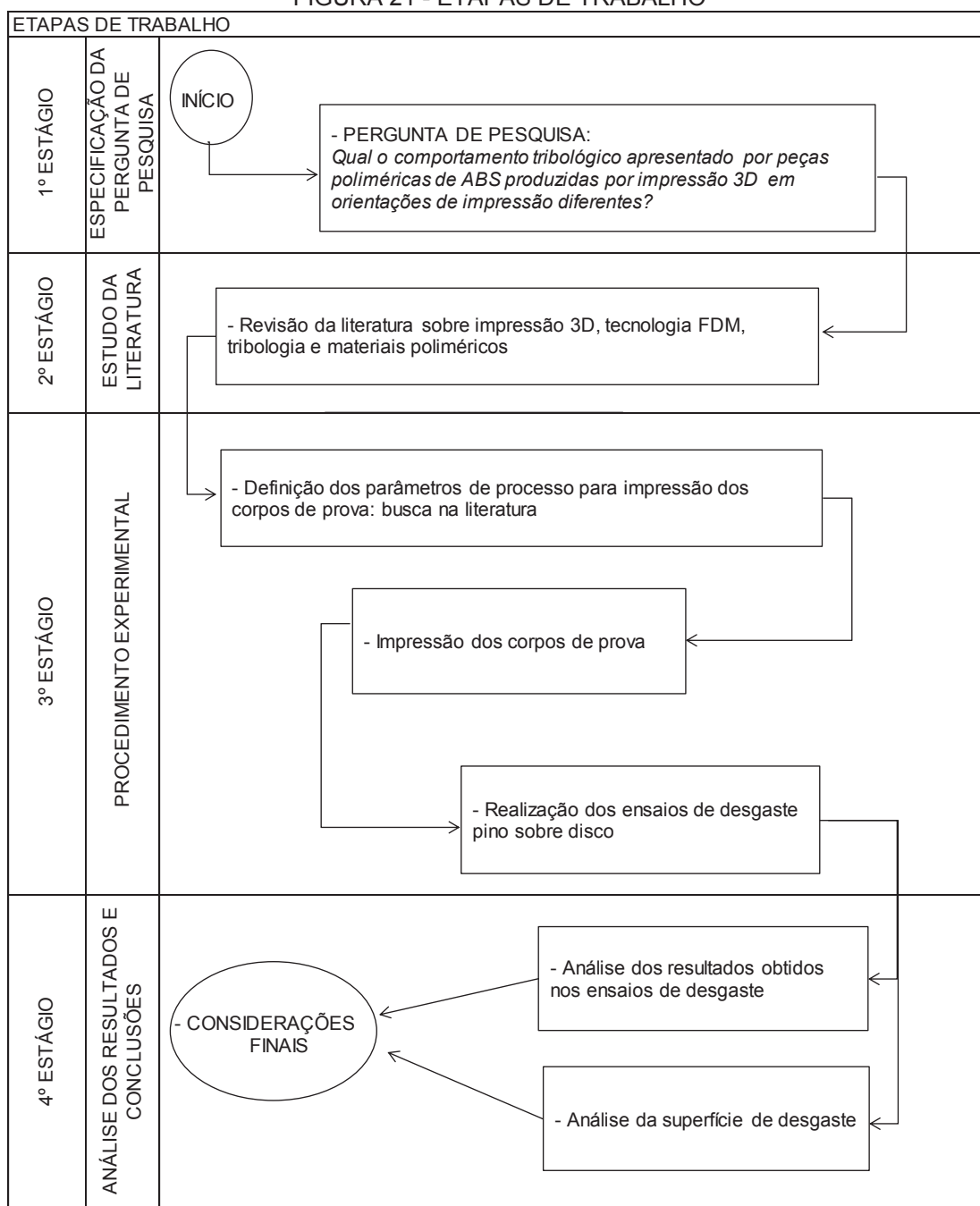
Na figura 20,  $F$  é a força normal no pino,  $d$  é o diâmetro do pino ou da esfera,  $D$  é o diâmetro do disco,  $R$  é o raio da trilha de desgaste e  $w$  é a velocidade de rotação do disco (ASTM INTERNATIONAL, 2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo será apresentada a metodologia aplicada neste trabalho, descrevendo os materiais e técnicas experimentais utilizadas para análise do comportamento de desgaste de peças de ABS produzidas por impressão 3D FDM.

A figura 21 apresenta as etapas do trabalho.

FIGURA 21 - ETAPAS DE TRABALHO



FONTE: A autora (2019)

No primeiro estágio, tem-se a definição da pergunta de pesquisa, a qual foi definida analisando o tema e contexto da pesquisa.

No segundo estágio é realizada revisão da literatura de alguns conceitos de impressão 3D, tecnologia FDM, tribologia e materiais poliméricos, visto que estes tópicos são necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

O terceiro estágio consiste no procedimento experimental, o qual é detalhado no item 3.1 a seguir.

### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1.1 Definição do material polimérico a ser utilizado para impressão dos corpos de prova

Conforme visto na literatura, o ABS é um dos polímeros mais utilizados na manufatura aditiva, sendo que junto com o PLA compõem 70% das peças fabricadas por impressão 3D utilizando-se termoplásticos (Gordon (2015)). Por este motivo e devido às boas propriedades mecânicas e o baixo custo que o mesmo apresenta, o ABS foi o polímero utilizado neste trabalho. O material foi fornecido pela marca TGape Química, em filamentos de diâmetro  $1,75 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  conforme figura 22. Sua ficha técnica com informações de propriedades mecânicas, temperatura e velocidade de impressão recomendadas pelo fabricante encontra-se no anexo 1 deste trabalho.

FIGURA 22 – FILAMENTO ABS UTILIZADO PARA IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

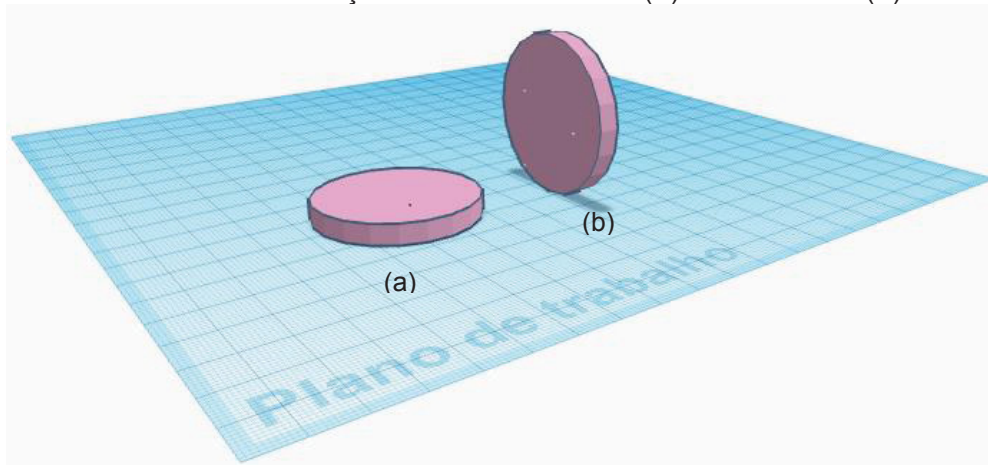


FONTE: A autora (2020)

### 3.1.2 Definição dos parâmetros de processo e impressão dos corpos de prova

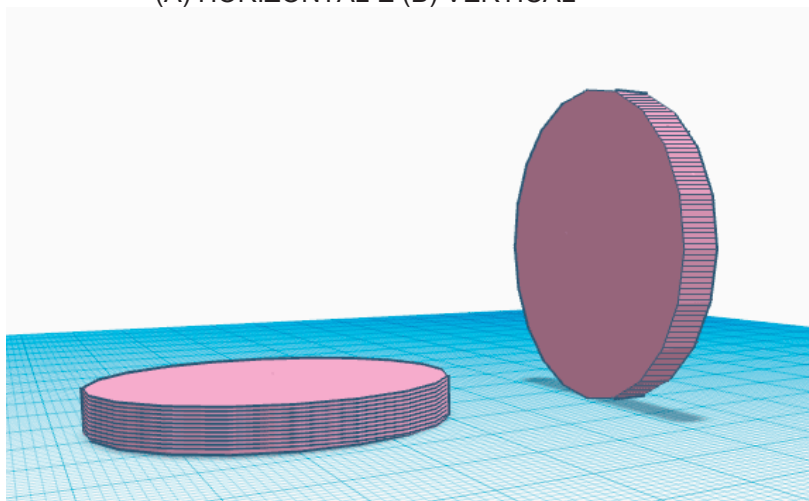
Inicialmente os desenhos das amostras foram criados no site [www.tinkercad.com](http://www.tinkercad.com). Na figura 23 tem-se um exemplo do desenho criado, com duas amostras, uma na orientação de impressão vertical e outra na orientação de impressão horizontal. Na figura 24 pode-se observar de forma mais próxima, como foram depositadas as camadas de ABS em cada uma das orientações de impressão utilizadas. Nas figuras 23 e 24 pode-se observar também que devido à superfície lateral das amostras não apresentar formato totalmente circular, não foi necessária a utilização de suportes para a impressão vertical.

FIGURA 23 – DESENHO DAS AMOSTRAS CRIADO NO SITE TINKERCAD APRESENTANDO AS DUAS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO: (A) HORIZONTAL (B) VERTICAL



FONTE: A autora (2020)

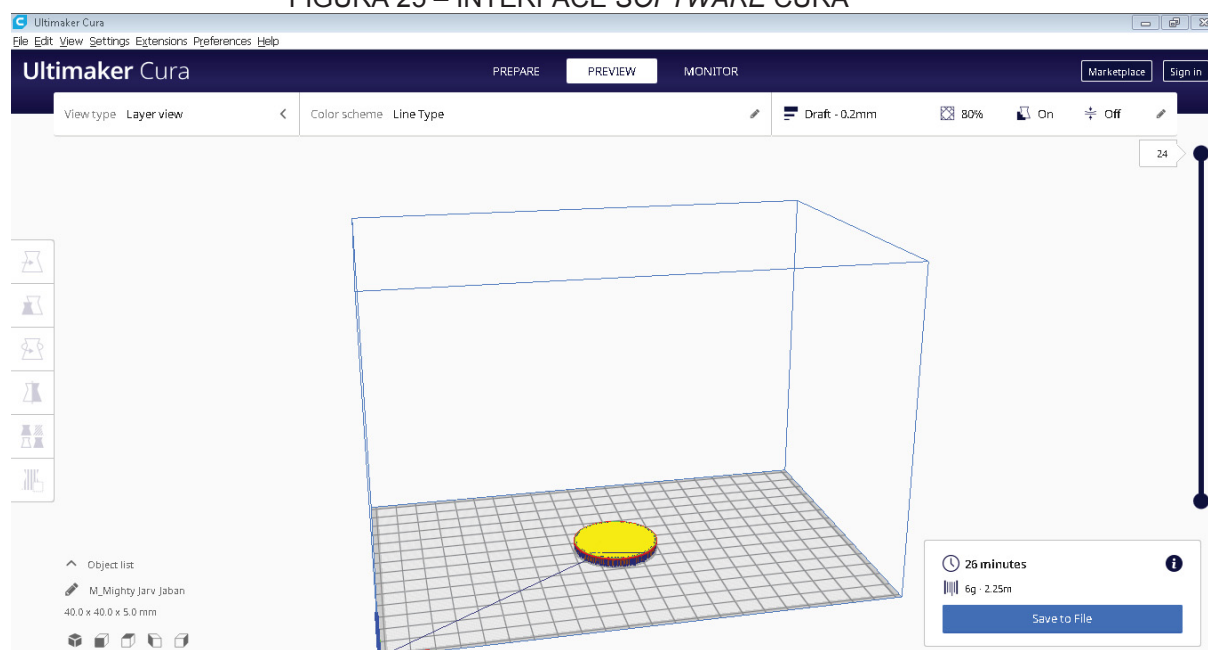
FIGURA 24 – DEPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE ABS NAS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO: (A) HORIZONTAL E (B) VERTICAL



FONTE: A autora (2020)

Após criar os arquivos dos desenhos, os mesmos foram convertidos em formato STL e inseridos no *software* fatiador, o qual é responsável por interpretar o desenho 3D de uma peça e a partir dos parâmetros selecionados pelo operador, gerar o código G que servirá como comandos para a impressora fabricar tal modelo. Neste trabalho, utilizou-se o *software* Cura 4.4. A figura 25 apresenta um exemplo da interface deste *software* para a impressão de uma amostra na orientação de impressão horizontal.

FIGURA 25 – INTERFACE SOFTWARE CURA



FONTE: A autora (2020)

Os parâmetros de impressão velocidade de impressão, ângulo de varredura, temperatura de extrusão e temperatura de plataforma de construção utilizados são apresentados na tabela 2. Estes parâmetros de processo foram definidos por Messimer et al. (2019) após testes de impressão em peças de ABS com o objetivo de avaliar a precisão dimensional. Neste estudo Messimer et al. (2019) utilizou inicialmente as configurações recomendadas pelos fabricantes das impressoras e então ajustou os parâmetros de impressão para produzir a melhor combinação de velocidade de impressão e qualidade da peça.

TABELA 2 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO FDM PARA ABS

<b>Material</b>	<b>Velocidade (mm/s)</b>	<b>Ângulo de varredura (°)</b>	<b>T extrusão (°C)</b>	<b>T plataforma de construção (°C)</b>
ABS	50	30	225	90

FONTE: Adaptado de Messimer et al. (2019)

Duas orientações de impressão foram aplicadas na impressão dos corpos de prova, resultando em duas configurações diferentes. Para cada configuração foram impressas 20 amostras, configurando um total de 40 corpos de prova.

Foram utilizados dois perímetros sólidos nas laterais da peça, ou seja, no momento da impressão primeiramente eram feitos dois contornos sólidos para posterior criação do interior das peças.

A tabela 3 apresenta as configurações de impressão que serão utilizadas.

TABELA 3 – CONFIGURAÇÕES DE IMPRESSÃO

<b>Parâmetro</b>	<b>Configuração 1</b>	<b>Configuração 2</b>
Orientação de impressão	Horizontal	Vertical
Velocidade de impressão (mm/s)	50	50
Ângulo de varredura (°)	30	30
Temperatura de extrusão (°C)	225	225
Temperatura da plataforma de construção (°C)	90	90
Altura da camada (mm)	0,2	0,2
Preenchimento (%)	80	80
Padrão de preenchimento	Linear	Linear

FONTE: A autora (2019)

A impressora 3D utilizada é da marca GTMax, modelo core AD, localizada no laboratório do Gima, na UFPR. A figura 26 apresenta o modelo.

FIGURA 26 – IMPRESSORA GTMAX CORE AD



FONTE: GTMax (2018)

A impressora possui área de impressão de 200 x 200 x 200mm, velocidade máxima de operação de 120mm/s e diâmetro de filamento do material de 1,75mm. A espessura de camada depositada varia de 0,05 mm a 0,32 mm e o seu bico extrusor possui diâmetro de 0,4mm.

### 3.1.3 Ensaio de desgaste – Pino sobre disco

Para a realização dos ensaios de desgaste, foi utilizado um tribômetro da marca CSEM Instruments, o qual é apresentado na figura 27. O mesmo está localizado no conjunto de laboratórios multiusuário, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

FIGURA 27 – TRIBÔMETRO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESGASTE



FONTE: A autora (2019)



A norma ASTM International (2017) G99 define os parâmetros e o procedimento para o ensaio pino sobre disco, sendo assim esta foi utilizada como referência para a realização deste ensaio neste trabalho. Os parâmetros carga, velocidade de deslizamento, temperatura e umidade utilizados, são definidos pela norma G99 são apresentados na tabela 4. A distância de deslizamento dos ensaios variou de 100 para 300 metros para avaliar a influência da mesma no comportamento de desgaste das amostras.

TABELA 4 – PARÂMETROS ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO

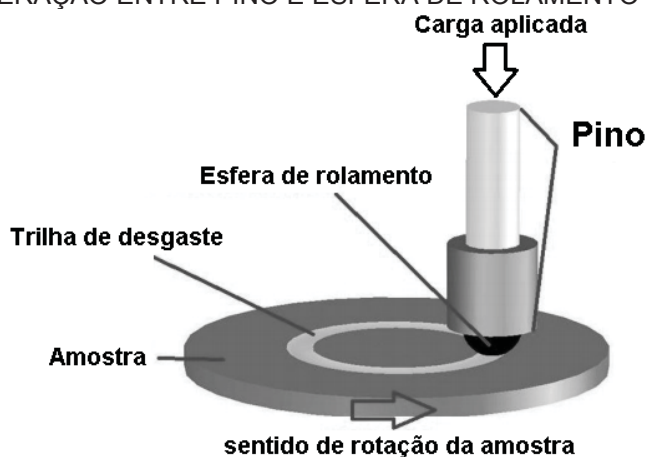
<b>Carga (N)</b>	<b>Velocidade de deslizamento (m/s)</b>	<b>Distância de deslizamento (m)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade (%)</b>
10	0,1	100 e 300	Ambiente ( $\approx 23^{\circ}\text{C}$ )	45

FONTE: Adaptado de ASTM International (2017) G99

Conforme recomendado na norma ASTM International (2017) G99, o pino deve apresentar formato cilíndrico ou esférico, com diâmetros variando de 2 a 10 mm. Neste trabalho foi utilizado um pino com uma esfera de rolamento de 6 mm de diâmetro, de aço cromo AISI 52100 – 100 Cr6.

Na figura 28 tem-se um esquema explicando a interação do pino e esfera de rolamento com a amostra.

FIGURA 28 – INTERAÇÃO ENTRE PINO E ESFERA DE ROLAMENTO COM A AMOSTRA



FONTE: Adaptado de Júnior et al. (2017)



A norma ASTM International (2017) G99, especifica que o diâmetros típicos das amostras de disco podem variar de 30 a 100 mm e apresentar uma espessura na faixa de 2 a 10 mm. Para os ensaios foram utilizados corpos de prova impressos com diâmetro de 40 mm e espessura de 5 mm (exemplos na figura 29).

FIGURA 29 – EXEMPLOS DE CORPOS DE PROVA IMPRESSOS



FONTE: A autora (2019)

Todos os corpos de prova passaram por processo de lavagem utilizando água e detergente, seguido por secagem por corrente de ar forçada e aquecida. Após a limpeza, foi utilizada uma balança digital analítica, da marca Shimadzu, com precisão 0,001 g para verificar a massa inicial dos discos. Após submeter os corpos de prova ao desgaste, o mesmo processo de limpeza foi utilizado antes da aquisição da massa ao final do ensaio.

#### 3.1.4 Análise dos resultados do ensaio de desgaste

Os resultados do ensaio de desgaste são apresentados sob a forma de perda de volume em milímetros cúbicos. Para a conversão de perda de massa em perda de volume foi utilizada a equação 01, definida pela norma ASTM G99.

$$V = \frac{W}{\rho} \quad (1)$$

Onde:

V = Perda de volume (mm<sup>3</sup>)

W = Perda de massa (g)

ρ = Densidade corpo de prova

A Análise de Variância (ANOVA - *Analysis of Variance*) e o Teste de Kruskal Wallis são ferramentas para comparação de vários grupos ou estratos de interesse, permitem investigar a existência de diferenças significativas entre os grupos estudados e as conclusões obtidas a partir destas ferramentas apresentam um nível de significância determinado pelo analista (MONTGOMERY, 1991). A ANOVA pode ser utilizada em casos em que os dados da amostra apresentem distribuição normal e o Teste de Kruskal Wallis para os casos em que a amostra não apresente normalidade. Para análise dos resultados de perda de volume, foram utilizadas estas duas ferramentas estatísticas, com o objetivo de identificar se as diferentes orientações de impressão utilizadas foram significativas para possíveis alterações no comportamento de desgaste, considerando-se um nível de significância de 5%.

### 3.1.5 Análise da superfície de desgaste

Para identificar o mecanismo de desgaste, foi realizada a análise da superfície de desgaste das peças, utilizando-se microscopia eletrônica de varredura.

Primeiramente foi depositada uma camada de ouro/paládio ( $\approx 120\text{\AA}$ ) nos corpos de prova, utilizando-se o método *Sputtering* em equipamento de recobrimento a plasma. Esse recobrimento fez-se necessário uma vez que os polímeros são maus condutores de eletricidade e, para o MEV, é preciso projeção de elétrons na superfície das amostras para a formação da imagem.

Para a captura das imagens foi utilizado o equipamento da marca Shimadzu, modelo SSX-550, localizado no complexo de laboratórios multiusuários da UEPG.

A partir dos resultados dos ensaios, foi caracterizado o mecanismo de desgaste para as peças poliméricas de ABS produzidas por impressão 3D FDM.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO

Inicialmente as amostras impressas foram numeradas de 1 a 40 e separadas conforme apresentado na tabela 5.

TABELA 5 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS POR ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO E DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DO ENSAIO DE DESGASTE

<b>Corpo de prova</b>	<b>Orientação de impressão</b>	<b>Distância de deslizamento do ensaio de desgaste (m)</b>
1 a 10	Horizontal	100
11 a 20	Horizontal	300
21 a 30	Vertical	100
31 a 40	Vertical	300

FONTE: A autora (2019)

Calculou-se então a densidade inicial dos corpos de prova, considerando-se sua massa e volume. Para o cálculo do volume inicial, foi utilizada a equação 2, fórmula de volume de um cilindro e para o cálculo da densidade foi utilizada a equação 3, fórmula de densidade.

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2)$$

Onde:

v = volume (mm<sup>3</sup>)

r = raio (mm)

h = altura (ou espessura do corpo de prova) (mm)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Onde:

ρ = Densidade corpo de prova

m = massa (g)

v = volume (mm<sup>3</sup>)

Segue tabela 6 com os resultados de média de cada grupo de amostras.

TABELA 6 – VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA

<b>Corpo de prova</b>	<b>Massa inicial média (g)</b>	<b>Volume inicial médio (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade média (g/mm<sup>3</sup>)</b>
1 a 10	5,5252	6236,9090	0,00089
11 a 20	5,5347	6086,9640	0,00091
21 a 30	6,4777	7283,7213	0,00089
31 a 40	6,4879	7222,0967	0,00090

FONTE: A autora (2019)

Após a limpeza dos corpos de prova, estes foram então pesados e submetidos aos ensaios de desgaste. Para os corpos de prova de 1 a 10 e 21 a 30 utilizou-se 100 metros de distância de deslizamento e para os corpos de prova de 11 a 20 e 31 a 40 utilizou-se 300 metros. Por fim, repetiu-se o processo de limpeza dos mesmos e conferiu-se novamente o peso de cada um.

Com os valores de massa inicial e final, calculou-se a perda de massa dos corpos de prova e este valor foi convertido em perda de volume em milímetros cúbicos. Para a conversão de perda de massa em perda de volume foi utilizada a equação 1, definida pela norma ASTM International (2017) G99, descrita no item 3.1.4.

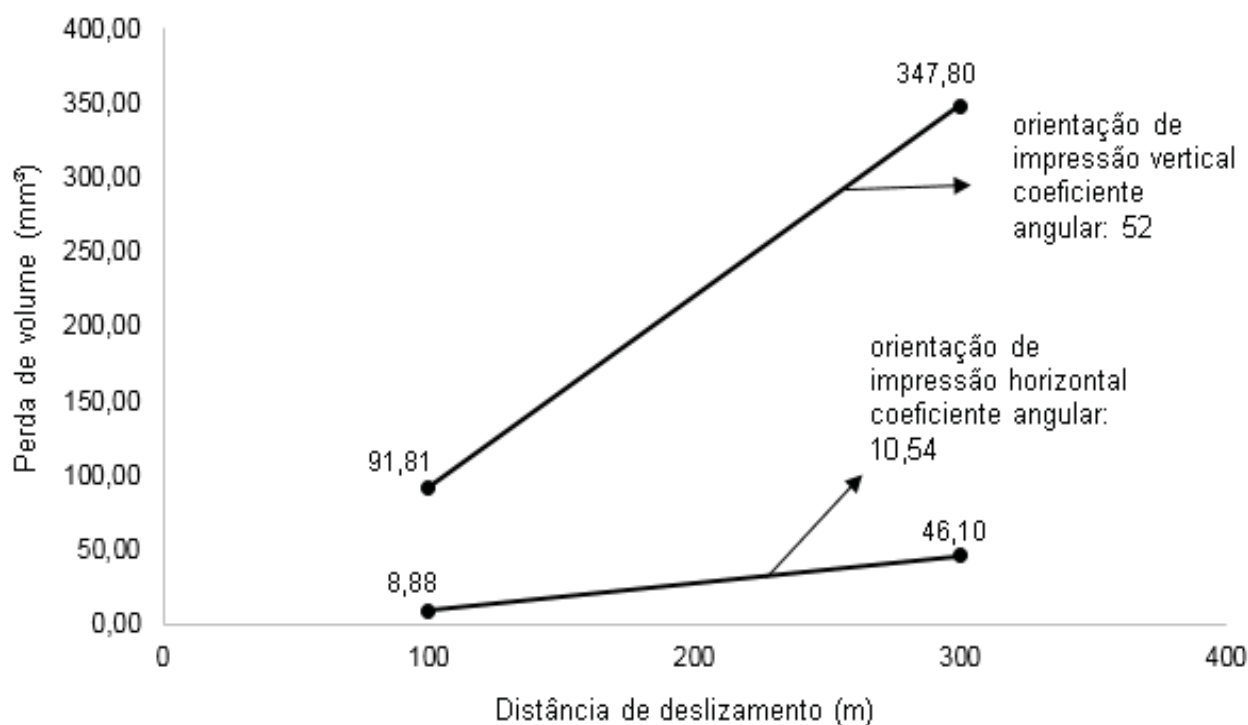
Na tabela 7, encontram-se os valores de perda de volume médio dos corpos de prova, obtidos após o ensaio de desgaste e na figura 30 é apresentado o aumento da perda de volume com o aumento da distância de deslizamento para as amostras impressas na horizontal e vertical.

TABELA 7 – VALORES MÉDIOS DE PERDA DE VOLUME DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE DESGASTE

<b>Corpo de prova</b>	<b>Massa final média (g)</b>	<b>Perda de massa (g)</b>	<b>Perda de volume (mm<sup>3</sup>)</b>
1 a 10	5,5173	0,0079	8,8756
11 a 20	5,4929	0,0418	46,0957
21 a 30	6,3961	0,0817	91,8127
31 a 40	6,1755	0,3124	347,7996

FONTE: A autora (2019)

FIGURA 30 – PERDA DE VOLUME COM O AUMENTO DA DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO



FONTE: A autora (2020)

Comparando-se os resultados, observa-se que a perda de volume foi aproximadamente 9 vezes maior nos corpos de prova impressos na orientação vertical em relação aos corpos de prova impressos na orientação horizontal.

Observando-se as retas do gráfico da figura 30 e analisando-se seus coeficientes angulares, conclui-se também que a aceleração da perda de massa é maior nas amostras impressas na vertical em relação às amostras impressas na horizontal.

Isso pode ser explicado devido ao fato de que além do desgaste abrasivo, as amostras impressas na orientação vertical apresentaram trincas na região entre as camadas de deposição do polímero, indicando baixa resistência na ligação entre as camadas, o que contribuiu para o aumento do desgaste. Isto será apresentado a seguir no item 4.3 onde tem-se a análise das superfícies de desgaste das peças.

Observa-se também que a perda de volume aumenta quando se aumenta a distância de deslizamento, em seu trabalho, Shipway; Ngao (2003) explicam que esta diferença é devido ao fato de que com o aumento da distância de deslizamento tem-se a formação de partículas de desgaste entre a esfera e o corpo de prova e o

mesmo passa de desgaste a dois corpos para três corpos, o que faz com que se aumente o desgaste da peça.

## 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram utilizadas as ferramentas ANOVA e Teste de Kruskal Wallis, para análise dos dados de perda de volume em  $\text{mm}^3$ . As fontes de variabilidade investigadas neste processo foram as direções de orientação de impressão e as análises contemplaram os resultados de perda de volume das 40 amostras, sendo os resultados separados para as distâncias de deslizamento do ensaio de desgaste. Para isto foi utilizada a ferramenta Excel.

Na tabela 8 são apresentados os resultados de perda de volume para os ensaios com distância de deslizamento de 100 m. Devido a estes dados não apresentarem distribuição normal, para a análise estatística dos mesmos foi utilizado o Teste de Kruskal Wallis e os resultados do mesmo são apresentados na tabela 9.

Na sequência tem-se as tabelas 10 com dados de perda de volume para os ensaios com distância de deslizamento de 300 m e como estes apresentaram distribuição normal, foi utilizada a análise de variância para a análise estatística os mesmos, a qual é apresentada na tabela 11.

TABELA 8 – RESULTADOS DE PERDA DE VOLUME PARA AMOSTRAS DOS ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 100M

Corpo de prova	Perda de volume ( $\text{mm}^3$ )	
	Amostras direção horizontal	Amostras direção vertical
1	9,1093	92,6384
2	8,5330	89,9936
3	8,6029	93,7085
4	8,4602	91,2925
5	7,9971	92,8303
6	9,4759	93,7263
7	8,7292	89,4106
8	9,1819	90,4798
9	8,6931	92,4343
10	9,9735	91,6130

FONTE: A autora (2019)

TABELA 9 – TESTE DE KRUSKAL WALLIS - RESULTADOS DE PERDA DE MASSA ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 100 M

Direção	$\Sigma^2$	$\Sigma^2/n$	$\Sigma(\Sigma^2/n)$	N	H	F crítico
Horizontal	7877,6480	787,7648	85083,5561	20	2367,9587	3,841
Vertical	842957,9132	84295,7913				

FONTE: A autora (2019)

Para um nível de significância  $\alpha = 0,05$ , obtemos que o F crítico é  $F_{(0,05;1)} = 3,841$ . Sendo o valor da estatística H maior o que F crítico pode-se afirmar com um nível de significância de 5% que existe uma relação significativa entre a orientação de impressão e a perda de volume das amostras.

TABELA 10 – RESULTADOS DE PERDA DE VOLUME PARA AMOSTRAS DOS ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300 M

Corpo de prova	Perda de volume (mm <sup>3</sup> )	
	Amostras direção horizontal	Amostras direção vertical
1	41,1617	363,6377
2	48,9759	337,2365
3	41,5097	358,6072
4	55,8582	335,1134
5	37,2111	339,5725
6	39,5354	345,2394
7	43,2439	350,9070
8	56,1222	343,6691
9	54,5116	351,5677
10	42,8277	352,4453

FONTE: A autora (2019)

TABELA 11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA – RESULTADOS DE PERDA DE MASSA DOS ENSAIOS COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300 M

Fonte da variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Teste F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	455126,0803	1	45126,0803	6617,1879	$1,4777 \times 10^{-24}$	4,4138
Dentro dos grupos	1238,0288	18	68,7794			
Total	456364,1092	19				

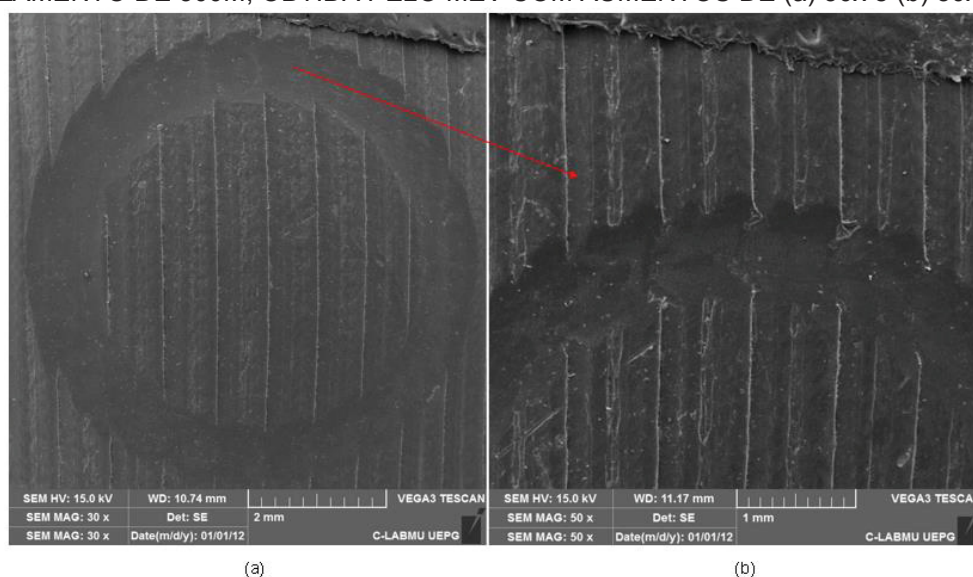
FONTE: A autora (2019)

Para um nível de significância  $\alpha = 0,05$ , obtemos que o F crítico é  $F_{(0,95;1;18)} = 4,4138$ . Sendo o valor de Teste F maior o que F crítico e também o valor de P-valor menor que  $\alpha$ , pode-se afirmar com um nível de significância de 5% que existe uma relação significativa entre a orientação de impressão e a perda de volume das amostras.

### 4.3 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE

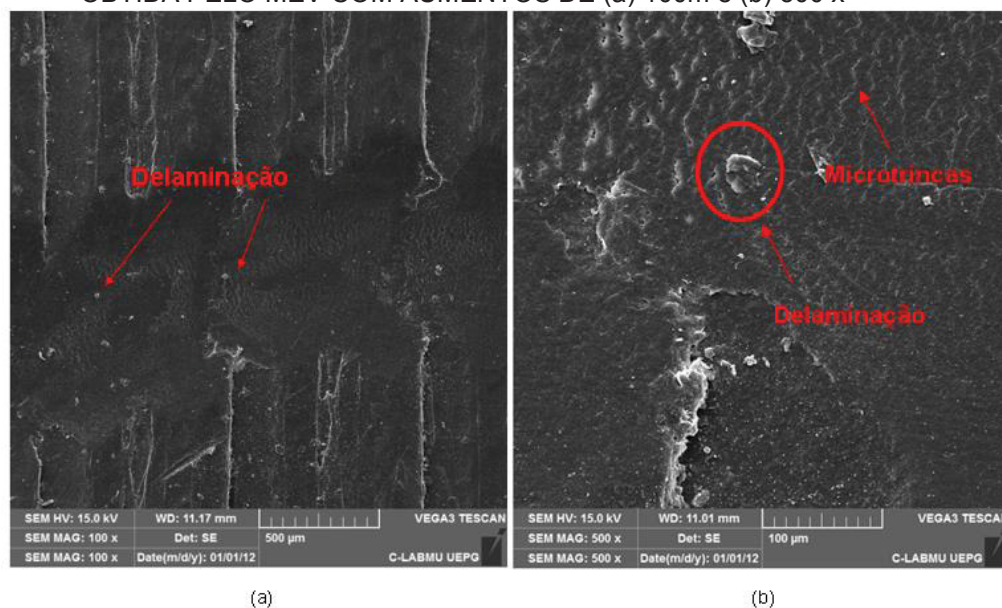
Foram analisadas as superfícies de desgaste das amostras, com auxílio de microscopia eletrônica de varredura, as figuras 31, 32, 34, 35 e 36 apresentam imagens obtidas.

FIGURA 31 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO HORIZONTAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTOS DE (a) 30x e (b) 50x



FONTE: A autora (2019)

Figura 32 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO HORIZONTAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTOS DE (a) 100x e (b) 500 x



FONTE: A autora (2019)



De acordo com Dong; Bell (1999), o desgaste por adesão ocorre em polímeros em muitos casos como resultado da deformação de trincas, causando microlascamento e delaminação. A análise das imagens sugerem que o mecanismo de desgaste nas amostras impressas na orientação horizontal foi por adesão, identificado nas amostras na forma de delaminação e microtrincas. Na figura 32 verifica-se circulado em destaque uma lâmina próxima a se desprender e pode-se observar também partículas já soltas. Este comportamento de desgaste pode ser classificado como interfacial, conforme visto na revisão da literatura.

A delaminação do ABS está associada, a um fenômeno conhecido por microtrincas, o qual antecede a fratura de polímeros. Segundo Callister; Renthwisch (2012) e Canevarolo (2006), regiões de alto escoamento localizado favorecem a formação de microvazios interconectados por pontes fibrilares. A ação de tensão trativa leva ao alongamento e ruptura destas pontes e então o coalescimento dos microvazios. Com o coalescimento tem-se a formação de trincas. Microtrincas podem ser observadas nas imagens obtidas no MEV como é apresentado na figura 32. A continuação da ação da tensão após a trinca ter sido formada, leva ao desprendimento de uma lâmina, desencadeando a delaminação.

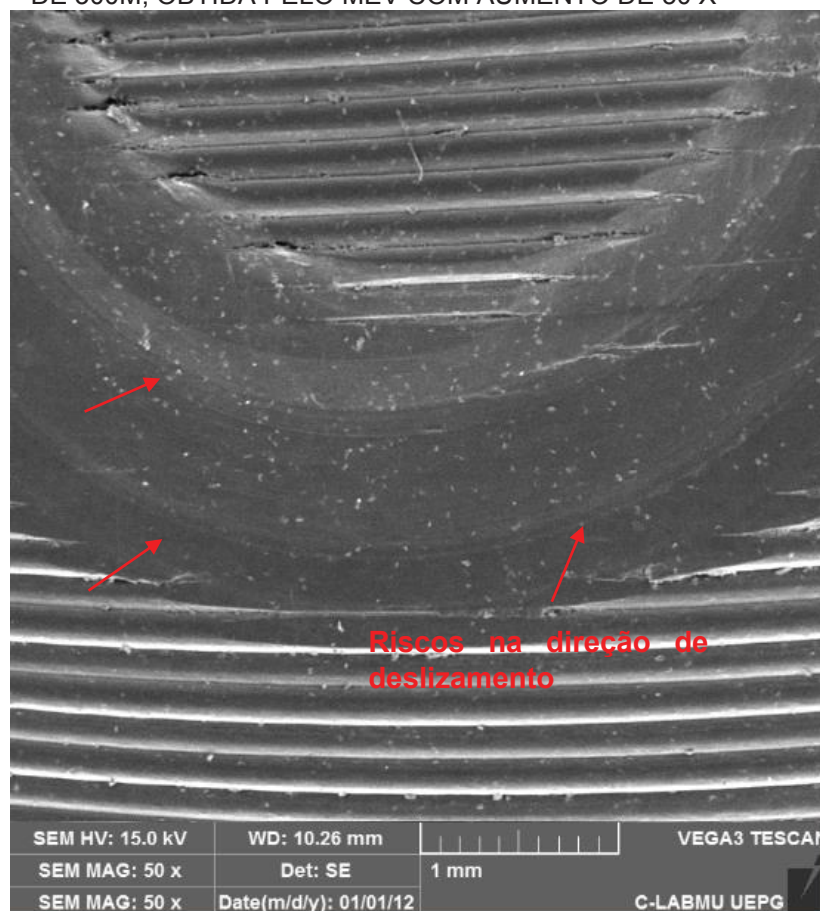
Outra característica do desgaste adesivo é a transferência de material do corpo para o contra-corpo, que pôde ser observada neste ensaio, com a transferência de material polimérico da amostra para o pino do equipamento, conforme apresentado na figura 33, foto registrada após o final do ensaio.

FIGURA 33 – PINO DO EQUIPAMENTO DE DESGASTE APÓS A REALIZAÇÃO DO ENSAIO COM A PRESENÇA DE MATERIAL POLIMÉRICO TRANSFERIDO DA AMOSTRA



FONTE: A autora (2019)

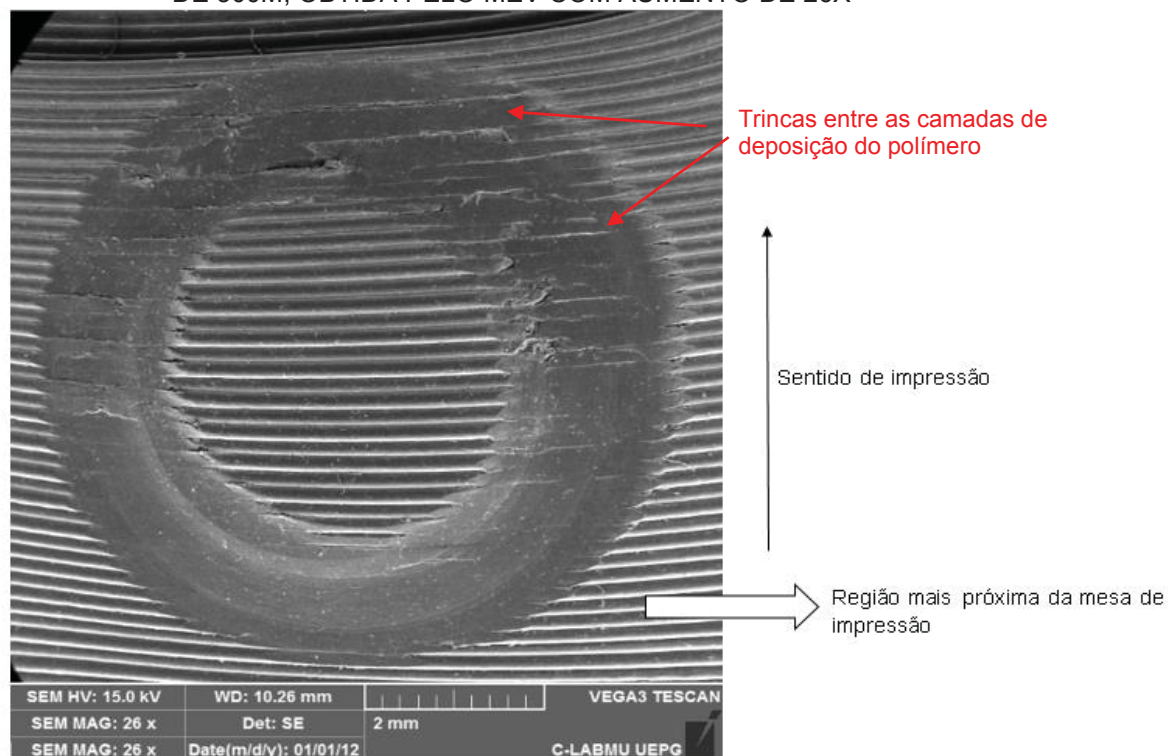
FIGURA 34 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO VERTICAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTO DE 50 X



FONTE: A autora (2019)

De acordo com Dong; Bell (1999), o desgaste abrasivo é causado pelas asperezas duras do contracorpo, as quais penetram no polímero (que é mais mole) e removem material por microcortes, microsulcamentos ou processos cisalhantes. Os riscos na direção de deslizamento observados na superfície do ABS na figura 34 são indicativos de abrasão a dois corpos. Comportamento este, de desgaste classificado como coesivo, conforme visto na revisão da literatura.

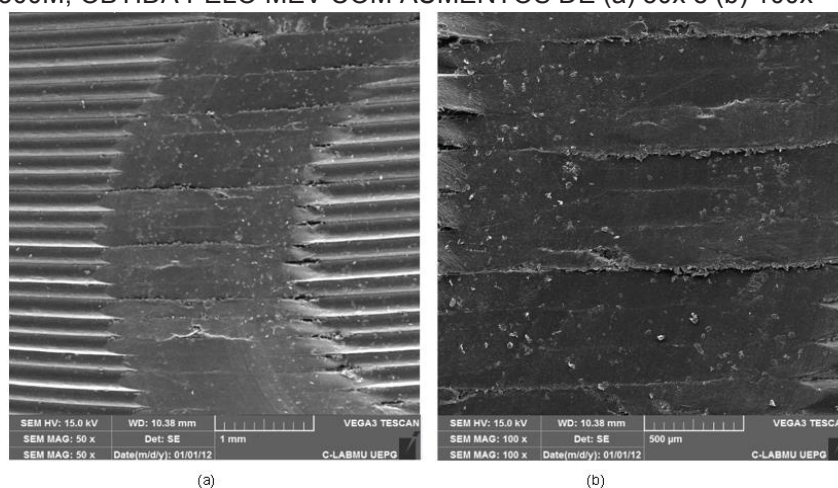
FIGURA 35 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO VERTICAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTO DE 26X



FONTE: A autora (2019)

Conforme apresentado na figura 35 e também na figura 36, observa-se nas amostras impressas na orientação vertical, trincas na região entre as camadas de deposição do ABS, indicando baixa resistência na ligação entre as camadas, o que contribuiu para o aumento do desgaste.

FIGURA 36 - SUPERFÍCIE DE UMA DAS AMOSTRAS COM ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO VERTICAL, APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO DE 300M, OBTIDA PELO MEV COM AUMENTOS DE (a) 50x e (b) 100x

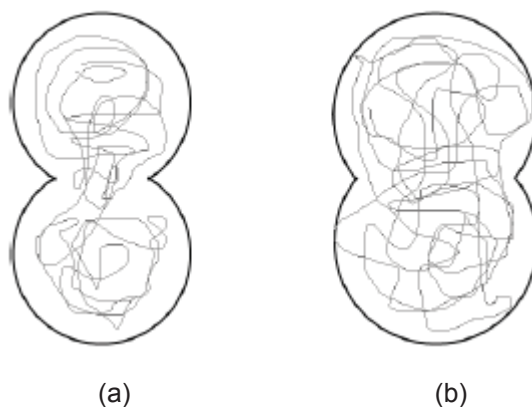


FONTE: A autora (2019)

Na figura 35 verifica-se também que as trincas estão presentes em maior quantidade na região mais afastada da mesa de impressão. Isto ocorre pois devido à mesa de impressão ser aquecida, a região da peça mais próxima da mesa apresenta temperatura mais elevada do que a região mais afastada. Quanto mais elevada a temperatura, menor é a viscosidade do polímero e por consequência as conexões entre as cadeias poliméricas são mais fracas, o que faz com que seja mais fácil as cadeias moleculares de uma camada ligarem-se às da outra camada. Esta facilidade significa que o número de ligações é maior, e portanto a união das duas camadas é mais forte (SOOD *et al.*, 2012 – 2).

Na Figura 37 apresenta-se esquematicamente o efeito da temperatura na ligação entre camadas, sendo que em (a) apresenta-se o caso de temperatura mais baixa (com menos ligações moleculares entre as duas camadas) e em (b) apresenta-se o caso de temperatura mais elevada (com mais ligações moleculares entre as duas camadas).

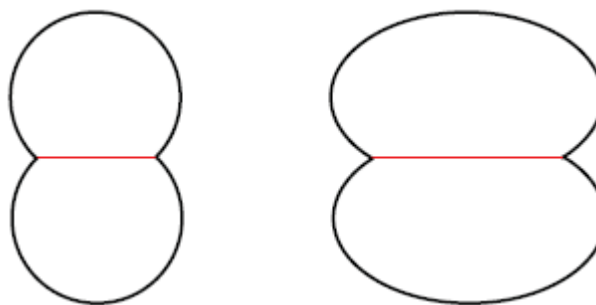
FIGURA 37 - EFEITO DA TEMPERATURA NA LIGAÇÃO ENTRE AS CAMADAS DE DEPOSIÇÃO DO POLÍMERO: (a) MENOR TEMPERATURA E (b) MAIOR TEMPERATURA



FONTE: A autora (2020)

A diminuição da viscosidade (derivada do aumento da temperatura) faz com que o filamento polimérico depositado perca o perfil circular adquirido durante a passagem pelo bico extrusor e adote um perfil oval. Este perfil oval proporciona uma maior área de contato entre duas camadas (SOOD *et al.*, 2012 – 2). Na Figura 38 apresenta-se esquematicamente estes dois tipos de perfis. No caso da menor temperatura (figura 38 - a) verifica-se que a área de contato (representada pela linha vermelha entre as camadas) é menor, em comparação com o caso da temperatura mais elevada (figura 38 – b).

FIGURA 38 - EFEITO DA VISCOSIDADE NA AREA DE CONTATO ENTRE AS CAMADAS DE DEPOSIÇÃO DO POLÍMERO: (a) MAIOR VISCOSIDADE E (b) MENOR VISCOSIDADE



FONTE: A autora (2020)

Sendo a ligação entre camadas melhor em temperaturas mais elevadas, devido à mesa de impressão ser aquecida a união entre as camadas da região mais próxima da mesa será maior do que a união entre as camadas da região mais afastada, e por isto observa-se maior quantidade de trincas entre as camadas na região mais afastada da mesa de impressão na figura 35.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando-se o resultados dos ensaios de desgaste dos corpos de prova de ABS testados e através da análise de variância, foi possível identificar que a orientação de impressão tem influência significativa no desgaste das peças, sendo que as peças que foram impressas na orientação vertical apresentaram maiores perdas de volume e conseqüentemente maior desgaste em relação às peças que foram impressas na orientação horizontal.

Em relação às distâncias de deslizamento utilizadas nos ensaios, verificou-se que com o aumento da distância de deslizamento, têm-se um aumento no desgaste das peças e isto ocorre devido ao fato de que com o aumento da distância de deslizamento têm-se a formação de partículas de desgaste entre a esfera e o corpo de prova e o mesmo passa de desgaste a dois corpos para três corpos, o que faz com que se aumente o desgaste da peça. Este comportamento foi observado nos ensaios das amostras de ambas as orientações de impressão utilizadas.

Analisando-se a superfície de desgaste das amostras foi possível identificar os mecanismos de desgaste que ocorreram após o ensaio. Nas amostras impressas na orientação horizontal observou-se a presença de delaminação e microtrincas na superfície de desgaste e também a transferência de material polimérico para o pino do equipamento do ensaio, o que indica que ocorreu o mecanismo de desgaste adesivo, característico da classe de desgaste polimérico interfacial.

Na superfície das amostras impressas na orientação vertical, observou-se a presença de riscos na direção do deslizamento, o que indica o mecanismo de desgaste abrasivo, característico da classe de desgaste polimérico coesivo.

Além do desgaste abrasivo, nas amostras impressas na orientação vertical, pôde-se visualizar também a presença de trincas entre as camadas de deposição do polímero, as quais contribuíram para o aumento do desgaste das peças.

Devido à mesa de impressão ser aquecida, a temperatura contribuiu para a união entre as camadas de deposição do polímero e por isto as camadas mais próximas da mesa de impressão apresentaram maior união entre si do que as camadas mais afastadas, onde observou-se maior quantidade de trincas.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, podem ser realizados estudos com diferentes temperaturas de impressão com objetivo de analisar a união entre as camadas de deposição do material polimérico e sua influência no desgaste das peças impressas na orientação vertical. E também estudos com ângulos de varredura maiores em peças impressas na orientação horizontal, com objetivo de analisar a união entre os filamentos da mesma camada e sua influência no desgaste das peças.



## REFERÊNCIAS

AHN, D.; KWEON, J.; KWON, S.; SONG, J.; LEE, S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5593–5600, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. 2013.

ASTM INTERNATIONAL. **G99 - 17 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. 2017.

BAGSIK, A. Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts Manufactured With Ultem \* 9085. **ANTEC**, 2011.

BELLINI, A. **Fused deposition of ceramics: A comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design**, 2002. Drexal University.

BOPARAI, K. S.; SINGH, R.; SINGH, H. Wear behavior of FDM parts fabricated by composite material feed stock filament. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 2, p. 350–357, 2016.

BOPARAI, K.; SINGH, R.; SINGH, H. Comparison of tribological behaviour for Nylon6-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ABS parts fabricated by fused deposition modelling. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 10, n. 2, p. 59–66, 2015.

BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. **Tribology International**, v. 14, n. 4, p. 231–243, 1981.

CALLISTER, W. D.; RENTHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais, uma introdução**. 8ª edição ed. LTD - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. Artliber, 2006.



COTTELEER, M. J. 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. **SIMT Additive Manufacturing Symposium**, p. 1–23, 2014.

CUNICO, M. W. M. **Impressoras 3D: O novo meio produtivo**. 1 edição ed. Curitiba: Concept3D Pesquisas Científicas LTDA, 2014.

DONG, H.; BELL, T. State-of-the-art overview: Ion beam surface modification of polymers towards improving tribological properties. **Surface and Coatings Technology**, v. 111, p. 29–40, 1999.

EBEWELE, R. O. **Polymer Science and Technology**. CRC Press, 1996.

ZUM GAHR, K. H. Microstructure and Wear of Materials. **Tribology Series**, v. 10, p. 1–7, 1987.

GOMEZ-GRAS, G.; JEREZ-MESA, R.; TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. A.; LLUMA-FUENTES, J. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. **Materials and Design**, v. 140, p. 278–285, 2018.

GORDON, R. Trends in commercial 3D printing and additive manufacturing. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 2, p. 89–90, 2015.

GTMAX. GTMax 3D Core AD. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-ad>>. Acesso em: 27/1/2020.

HODGSON, G.; RANELLUCCI, A.; MOE, J. Slic3r Manual - Print Settings. Disponível em: <<https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings>>. Acesso em: 27/01/2020.

HULL, C. W.; ARCADIA, C. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. U.S. Patent Documents, 1986.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. Arnold, 1992.

IMPRESSÃO 3D PORTUGAL. O que é o preenchimento de uma Impressão 3D? Disponível em: <<https://impressao3dportugal.pt/o-que-e-o-preenchimento-de-uma-impressao-3d/>>. Acesso em: 2/2/2020.

JAHANGIR, M. N.; MAMUN, M. A. H.; SEALY, M. P. A Review of Additive Manufacturing of Magnesium Alloys. In: American Institute of Physics (Org.); **Anais da 12th International Conference on Mechanical Engineering**, 2018.

JOST, H. P. Tribology - Origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1–17, 1990.

JÚNIOR, R. S.; CURI, E. I. M.; PERUCH, F.; CASTRO, R. DE M. Estudo Comparativo do desgaste abrasivo por rejeito do carvão mineral na calha de direcionamento utilizando Aço Inoxidável Aço Domex 700W e o Polímero Uhmw. **Anais do V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**, 2017.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear Mechanisms. **Modern tribology handbook: Vol 2**, CRC Press, 2001.

KROLL, E.; ARTZI, D. Enhancing aerospace engineering students ' learning with 3D printing wind-tunnel models. **Rapid Prototyping Journal**, v. 5, p. 393–402, 2011.

LAN, P.; CHOU, S.; CHENT, L.; GEMMILL, D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. **Computer-Aided Design**, v. 29, n. 1, p. 53–62, 1997.

MANÇANARES, C. G.; ZANCUL, E. D. S.; CAVALCANTE, J.; MIGUEL, P. A. C. Additive manufacturing process selection based on parts selection criteria. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, p. 1007–1014, 2015.

MANO, E. B. **Introdução a Polímeros**. Edgar Blucher Ltda., 1991

MELNIKOVA, R.; EHRMANN, A.; FINSTERBUSCH, K. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials.

**Anais da IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.**, 2014.

MESSIMER, S.; PEREIRA, T.; PATTERSON, A.; LUBNA, M.; DROZDA, F. Full-Density Fused Deposition Modeling Dimensional Error as a Function of Raster Angle and Build Orientation: Large Dataset for Eleven Materials. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 1, p. 6, 2019.

MOUSTA IMPRESSORAS 3D. O que é impressão 3D. Disponível em: <<https://www.mousta.com.br/o-que-e-impressao-3d/>>. Acesso em: 2/2/2020.

MURPHY, S. V; ATALA, A. **3D bioprinting of tissues and organs - Nature Biotechnology**, Nature Publishing Group, 2014.

NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L.; KURIC, I. Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology. **Manuf. and Ind. Eng**, v. 11, n. 1, p. 1338–6549, 2012.

PALERMO, E. What is Laminated Object Manufacturing? Disponível em: <<http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>>. Acesso em: 8/3/2019.

PETERSON, E. M. B.; WINER, W. O. **Wear Control Handbook**. Elsevier Scientific, 1981.

PORSANI, R. N.; SILVA, B. B.; HELLMEISTER, L. A. V. Revisão teórica da história da manufatura aditiva e das propriedades dos principais insumos e estruturas de preenchimento nas impressoras 3d fdm. **Anais do II Congresso Internacional e VIII Workshop: Design & Materiais**, 2017.

SANTINER, E.; CZICHOS, H. Tribology of Polymers. **Tribology International**, v. 22, n. 2, p. 103–109, 1989.

SCHLAEPFER, R. C.; KOCH, M.; MERKOFER, P. **Industry 4.0: Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies**. 2015.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. 1ª ed., Edipro, 2016.

SHIPWAY, P. H.; NGAO, N. K. Microscale abrasive wear of polymeric materials. **Wear**, v. 255, p. 742–750, 2003.

SINATORA, A. **Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte**. Universidade de São Paulo, 2005.

SINGH, R.; SINGH, N.; AMENDOLA, A.; FRATERNALI, F. On the wear properties of Nylon6-SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based fused deposition modelling feed stock filament. **Composites Part B**, v. 119, p. 125–131, 2017.

SOOD, A. K.; EQUBAL, A.; TOPPO, V.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. An investigation on sliding wear of FDM built parts. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 48–54, 2012.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture**, v. 224, n. 1, p. 135–145, 2009.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials and Design**, v. 31, n. 1, p. 287–295, 2010.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. **Journal of Advanced Research**, v. 3, n. 1, p. 81-90, 2012 (2)

SUH, N. P. The delamination theory of wear. **Wear**, v. 25, p. 111–124, 1973.

SULAVIK, C.; WALLER, T. **3D Printing comes of age in US industrial manufacturing**. PwC and Manufacturing Institute, 2016.

SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.

TAKAGAKI, L. K. Tecnologia de impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, v. 2, n. 2, p. 28–40, 2012.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. **Materials and Design**, v. 58, p. 242–246, 2014.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. **Assembly Automation**, v. 23, n. 4, p. 318–330, 2003.

VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: Tecnologias e aplicações**. 1ª ed., Blücher, 2007.

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. **Composites Part B**, v. 110, p. 442–458, 2017.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, n. 1, p. 1–10, 2012.

WU, W.; YE, W.; WU, Z.; et al. Influence of layer thickness, raster angle, deformation temperature and recovery temperature on the shape-memory effect of 3D-printed polylactic acid samples. **Materials**, v. 10, n. 8, 2017.

YAMAGUCHI, Y. **Tribology of plastic materials**. Elsevier, 1990.

YUAN, L. **A preliminary research on development of a fiber-composite, curved FDM system**, National University of Singapore, 2008.

## ANEXO 1


**TQ-COLOR 3D**

## ABS

- Características:

Temperatura de transição vítrea – 107 °C

Diâmetro do filamento – 1,75mm ± 0,2mm

Temperatura de impressão recomendada – 210 a 235 °C

Temperatura de mesa recomendada – 80 a 120 °C

Velocidade de impressão recomendada – 50 a 100 mm/s

Comprimento do filamento – 400 metros

Embalagem – carretéis de 1kg embalados a vácuo

- Propriedades:

Propriedade	Método de teste	Unidade	Valor
Resistência à tração	D638	Kg/cm <sup>2</sup>	430
Alongamento na ruptura	D368	%	30
Módulo de flexão	D790	Kg/cm <sup>2</sup>	25000
Dureza	D785		105
Resistência ao impacto IZOD	D256	Kg·cm/cm	25

- É ideal para impressão de pequenas partes e de peças com alto grau de precisão dimensional
- Pode ser trabalhado após a impressão, com processos como abrasão, polimento, galvanoplastia, tingimento e impressão
- Apresenta grande tenacidade e excelente resistência ao impacto, o que o torna ideal para fabricação de partes mecânicas
- Tem excelente durabilidade
- Pode ser usado industrialmente
- Requer aquecimento da mesa da impressora